



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ciencias Físicas

Escuela Profesional de Física

**“Importancia del control de calidad de un equipo de
radiografía general”**

MONOGRAFÍA TÉCNICA

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

Modalidad M3

AUTOR

Edson GUZMÁN GUERREROS

ASESOR

Galo PATIÑO CAMARGO

Lima, Perú

2018



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Guzmán, E. (2018). *“Importancia del control de calidad de un equipo de radiografía general”*. [Monografía técnica de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.



7782 A.

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE MONOGRAFÍA TÉCNICA PARA OPTAR EL
TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA**

Siendo las 17:00 horas del martes 29 de mayo de 2018, en el Salón de Grados de la Facultad de Ciencias Físicas (Auditorio 109), bajo la Presidencia del Mg. Fernando Márquez Pachas (Presidente), Lic. Antonio Escalante Aburto (Miembro), y el Dr. Galo Patiño Camargo (Asesor), se dió inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Monografía Técnica para la Licenciatura en Física, mediante la Modalidad M3 – Por Suficiencia Profesional, del Bachiller:

EDSON GUZMÁN GUERREROS


Dando lectura al Resumen del Expediente, el Presidente del Jurado, invitó al Bachiller Edson Guzmán Guerreros a realizar una exposición del Trabajo de Monografía Técnica titulada: "Importancia del control de calidad de un equipo de radiografía general".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente, invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado. Asimismo, se verificó que el promedio obtenido por el bachiller en el VIII Ciclo de Actualización Profesional es de QUINCE (15).

Al término de la deliberación del Jurado el Mg. Fernando Márquez Pachas, invitó al candidato y al público a pasar a la Sala de Sesión, para dar lectura al resultado de la deliberación. Ha obtenido la calificación de:

15	18	17
NOTA DEL VIII CAP	NOTA DE LA SUSTENTACIÓN DE LA MONOGRAFÍA	PROMEDIO

Finalmente, el Presidente del Jurado, propone al Consejo de la Facultad que se le declare Licenciado en Física al Bachiller Edson Guzmán Guerreros En virtud de haber obtenido un promedio de... DISCISIETE (17). Según el artículo 46° del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ciencias Físicas. Siendo las 18:00 Horas, se levanta la Sesión.


Mg. Fernando Márquez Pachas
PRESIDENTE


Lic. Antonio Escalante Aburto
MIEMBRO


Dr. Galo Patiño Camargo
ASESOR

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	OBJETIVOS.....	3
II.1	OBJETIVO GENERAL	3
II.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
III.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	4
III.1	CLASIFICACIÓN DE LA RADIACIÓN	4
III.2	INTERACCIÓN DE LA MATERIA CON LOS FOTONES.....	5
III.3	COEFICIENTES DE ATENUACIÓN MÁSICO	9
III.4	PRODUCCIÓN DE RAYOS X.....	11
III.5	ATENUACIÓN DE HACES DE FOTONES	13
III.6	ESPECTRO DE RAYOS X	16
III.7	FACTORES QUE AFECTAN EL ESPECTRO DE RAYOS X	17
III.8	MAGNITUDES Y UNIDADES RADIOLÓGICAS.....	19
III.9	RADIOBIOLOGÍA	29
III.10	PROTECCIÓN RADIOLÓGICA.....	36
III.11	EQUIPO DE RADIOGRAFÍA GENERAL.....	43
III.12	CONTROL DE CALIDAD DE EQUIPOS DE EQUIPOS DE RAYOS X MÉDICO ...	46
IV.	MATERIAL Y MÉTODO.....	48
IV.1	EQUIPOS DE MEDIDA E INSTRUMENTOS USADOS EN EL CONTROL DE CALIDAD	48
IV.2	PRUEBAS REALIZADAS EN EL CONTROL DE CALIDAD DE UN EQUIPO DE RADIOGRAFÍA GENERAL	51
IV.3	CARACTERÍSTICAS DE LOS EQUIPOS DE RADIOGRAFÍA GENERAL EVALUADOS	63
IV.4	CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL DE CALIDAD.....	64
V.	RESULTADOS	67
VI.	DISCUSION.....	71
VII.	CONCLUSIONES.....	74
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
IX.	ANEXO	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Factores que afectan al tamaño y la posición relativa de los espectros de emisión de rayos x.....	18
<i>Tabla 2:</i> Magnitudes dosimétricas tratadas en dos contextos	20
Tabla 3: Conceptualmente kerma	22
<i>Tabla 4:</i> Conceptualmente la exposición	24
<i>Tabla 5:</i> Conceptualmente dosis absorbida	27
<i>Tabla 6:</i> Poblaciones humanas en las que se han observado efectos radiactivos.....	30
<i>Tabla 7:</i> Respuesta humanas a la radiación ionizante.....	32
Tabla 8: Límites de dosis especificados en las Normas Básicas de Seguridad del IAEA.....	41
<i>Tabla 9:</i> Niveles orientativos de dosis aplicables en radiografía diagnóstica a un paciente adulto típico	42
Tabla 10: Equipos de radiografía general según la modalidad del sistema de procesado	46
<i>Tabla 11:</i> Pruebas de control de calidad y sus tolerancias – Parámetros geométricos y calidad del haz.....	52
Tabla 12: Pruebas de control de calidad y sus tolerancias – tiempo de exposición, rendimiento y rejilla	53
Tabla 13: Pruebas de control de calidad y sus tolerancias – control automático exposición (CAE) en sistemas de película-pantalla y control automático exposición (CAE) en sistemas digitales: paneles planos y radiografía computarizada (CR).....	54
<i>Tabla 14:</i> Pruebas de control de calidad y sus tolerancias –sistemas digitales de registro de panel plano	55
Tabla 15: Pruebas de control de calidad y sus tolerancias –sistema digitales de registro de panel plano y sistema de medida de dosis	56
Tabla 16: Pruebas de control de calidad de un equipo de radiografía general	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Geometría para la dispersión Compton	7
Figura 2: Coeficientes de atenuación másico para agua para fotones de energía desde 1 keV a 300 keV.....	10
Figura 3: Regiones de predominancia relativa de las tres principales formas de interacción de los fotones con la materia	11
Figura 4: Esquema del interior de una ampolla de rayos x.....	12
Figura 5: Esquema que muestra la producción de rayos x y por ende el haz útil y la radiación de fuga	13
Figura 6: Representación gráfica de los resultados experimentales para obtener la capa hemireductora (CHR) o Half Value Layer (HVL).....	15
Figura 7: Esquema experimental para la determinación de la capa hemireductora (HVL).....	15
Figura 8: (a) Espectro de bremsstrahlung ideal para un ánodo de tungsteno (voltaje del tubo de 90 kV), (b) un espectro real en la salida del haz, incluidos los rayos X característicos (ángulo del ánodo 20 °, filtración inherente 1 mm Be) y (c) el espectro filtrado con un equivalente de 2,5 mm Al.	16
Figura 9: Espectro de rayos x generado mediante la variación del kV.	18
Figura 10: Espectro de rayos x generado con dos materiales distintos en el ánodo.....	19
Figura 11: Paso del kerma en aire en el seno de aire al kerma en un material	21
Figura 12: Descripción del sentido de la definición de exposición y de su medida asociada.....	23
Figura 13: Ilustración simplificada de los conceptos de kerma (energía transferida) (a) (b) y de dosis absorbida (energía impartida) y de su relación (c) (d).	28
Figura 14: Esquema de las magnitudes definidas para un tubo de rayos X convencional.....	29
Figura 15: Secuencia de acontecimientos que pueden suceder después de la exposición a la radiación de un tejido biológico.	31
Figura 16: Curvas esquemáticas de incidencia frente a dosis absorbida para efectos estocásticos. Se presentan tres posibilidades: lineal sin umbral, lineal con umbral y curva “en U” (“o en J”)	36
Figura 17: Partes de un equipo de radiografía general.....	44
Figura 18: Equipos de radiografía general: (a) Equipo fijo. (b) Equipo rodante (c) Equipo portátil.....	45
Figura 19: Multianalizador para radiografía general o también llamado digitalizador.....	49
Figura 20: Sensor para radiografía general.	49
Figura 21: Test de colimación.	49
Figura 22: Test de alineamiento.....	50
Figura 23: Filtros de aluminio.....	50

Figura 24: Luxómetro.....	50
Figura 25: Nivel, huincha y cinta adhesiva.....	50
Figura 26: Anexo V, Control de calidad de equipo de radiografía general..	57
Figura 27: Prueba para verificar el tamaño mínimo de campo.	59
Figura 28: Resultado después de la exposición en eje transversal del equipo de radiografía general.	59
Figura 29: Resultado después de la exposición en eje longitudinal del equipo de radiografía general.	60
Figura 30: Prueba para verificar distancia foco – detector de imagen.	60
Figura 31: Prueba para verificar definición del campo luminoso, simetría y penumbra.....	60
Figura 32: Prueba para verificar definición del campo luminoso, iluminación del campo luminoso.	61
Figura 33: Prueba para verificar la alineación y el centrado del campo luz – campo de radiación y campo de registro, para verificar el sistema de colimación y para verificar la ortogonalidad del haz de rayos x y el receptor de imagen.	61
Figura 34: Resultado después de la exposición para verificar la alineación y el centrado del campo luz – campo de radiación y campo de registro, para verificar el sistema de colimación y para verificar la ortogonalidad del haz de rayos x y el receptor de imagen.	61
Figura 35: Prueba para verificar la exactitud del tiempo de exposición y kV, reproducibilidad del tiempo de exposición y kV, valor del rendimiento, repetibilidad del rendimiento, linealidad, variación con la carga y la corriente, filtración o HVL y dosis en la superficie del paciente.	62
Figura 36: Medidas observadas después de la exposición con una técnica radiográfica elegida.....	62
Figura 37: Prueba para verificar el valor del HVL del equipo.....	63
Figura 38: Porcentaje de equipos aprobados y desaprobados en el control de calidad.	68
Figura 39: Estadística de las pruebas de control de calidad desaprobadas.	69
Figura 40: Estadística de la modalidad del sistema de visualización de la imagen.	70

RESUMEN

Esta monografía técnica tiene como objetivo mostrar la importancia del control de calidad de un equipo de radiografía general, la cual se encuentra enmarcada en protocolos de protección radiológica (SEFM y SEPR, 2012, 19). En este trabajo se muestran las pruebas y el resultado final del control de calidad que se realizó a equipos de radiografía general de diferentes instituciones a nivel nacional; estas evaluaciones se realizaron bajo la gerencia de la empresa X RAY QUALITY CONTROL S.A.C., empresa autorizada por la Oficina Técnica de la Autoridad Nacional (OTAN) del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) para brindar este servicio. Estas evaluaciones se realizaron en los años 2016 y 2017.

Se realizó el análisis estadístico de los resultados obtenidos en las pruebas de control de calidad, encontrando que un porcentaje considerable (89.1 %) son equipos aprobados y que el porcentaje restante (10.9 %) corresponde a equipos desaprobados. En estos equipos desaprobados las pruebas que resultan con mayor frecuencia fuera de la tolerancia establecida son: el sistema de colimación, la filtración del equipo o HVL, la exactitud del kV, la exactitud del tiempo, la dosis en la entrada del paciente y el rendimiento del equipo.

En este trabajo se muestra de manera breve que en nuestro país existe una diversidad de equipos de radiografía general, en cuanto a su modo de uso, aplicación, sistema de procesamiento de imagen, etc.; Por lo antes mencionado, podemos concluir que existe la necesidad de realizar el control de calidad de manera periódica, asegurando que la calidad de imagen diagnóstica, en los exámenes radiográficos, sea la adecuada, teniendo en cuenta la protección radiológica del paciente y del trabajador ocupacionalmente expuesto.

Palabras clave:

Control de calidad, Radiografía general, Protección radiológica.

ABSTRACT

This technical monograph aims to show the importance of quality control of a general radiography equipment, which is framed in radiological protection protocols (SEFM y SEPR, 2012, 19). In this work the tests and the final result of the quality control that was carried out to general radiography equipment of different institutions at national level are shown; these evaluations were conducted under the management of the company X RAY QUALITY CONTROL S.A.C., company authorized by the Oficina Técnica de la Autoridad Nacional (OTAN) of the Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) to provide this service. These evaluations were carried out in the years 2016 and 2017.

The statistical analysis of the results obtained in the quality control tests was carried out, finding that a considerable percentage (89.1%) are approved equipment and that the remaining percentage (10.9%) corresponds to disapproved equipment. In these disapproved equipment, the tests that most frequently result outside the established tolerance are: the collimation system, the filtration of the equipment or HVL, the accuracy of the kV, the accuracy of the time, dose at the patient's entrance and the performance of the equipment.

In this work, it is briefly shown that in our country there is a diversity of general radiography equipment, in terms of its use, application, image processing system, etc.; For the above mentioned, we can conclude that there is a need to perform quality control periodically, ensuring that the diagnostic image quality, in radiographic examinations, is adequate, taking into consideration the radiological protection of the patient and the worker occupationally exposed.

Keywords:

Quality control, General radiography, Radiation protection.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente el uso de los equipos de rayos x en la medicina se ha incrementado aceleradamente, tanto en el número de equipos instalados como el número de pacientes atendidos, sucede esto en especial en especial con el equipo de radiografía general. Esto debido a su versatilidad y diversidad en el diagnóstico de diversas dolencias. El avance de la tecnología ha implementado mejoras y cambios en la forma de utilizar estos equipos, especialmente en el sistema de procesamiento de las imágenes, apareciendo así nuevos parámetros a considerar en la protección radiológica y en la evaluación del control de calidad. Este avance de la tecnología genera de manera indirecta el incremento de la dosis entregada en los pacientes de radiodiagnóstico, causada como consecuencia por el cambio en la tecnología usada para la visualización de las imágenes en los equipos actuales de radiografía general.

En la actualidad el número de equipos instalados de radiografía general digital ha crecido considerablemente y se conoce que en estos equipos las dosis entregadas a los pacientes son mayores en comparación con la radiografía convencional. Por lo tanto para evaluar la dosis entregada y los demás parámetros importantes del equipo, se debe realizar el control de calidad a todos los equipos de radiografía general, y así verificar el correcto funcionamiento de los parámetros técnicos, geométricos y medidas de dosis, y de esta manera proteger al paciente (ARCAL XLIX, 2001, 6).

En nuestro país la institución que regula y controla el uso seguro de las fuentes de radiaciones ionizantes y por ende el control de calidad de equipos de rayos x médico es el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), esta función la cumple a través de la Oficina Técnica de la Autoridad Nacional (OTAN), la

cual en el año 2013 emitió la norma técnica IR.003.2013 “REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNÓSTICO MÉDICO CON RAYOS X” que en su anexo V describe las pruebas de control de calidad que se deben de realizar a cada equipo de rayos X según su modalidad (Norma técnica IR.003.2013, 2013, p. 17).

El control de calidad de los equipos de rayos x, utiliza como referencia protocolos de control de calidad en radiodiagnóstico, siendo los más utilizados los siguientes: Protocolo Español de Control de Calidad en Radiodiagnóstico, revisión 2011, publicado por la Sociedad Española de Física Médica (SEFM), Sociedad Española de Protección Radiológica (SEPR) y Sociedad Española de Radiología Médica (SERAM) y Protocolos de Control de Calidad en Radiodiagnóstico, Proyecto ARCAL XLIX, publicado por la International Atomic Energy Agency (IAEA). Cabe mencionar que en la región existe una carencia de protocolos de este tipo, adecuados a las condiciones de cada país a pesar de la gran cantidad de centros de radiodiagnóstico existentes. (ARCAL XLIX, 2001, 6).

II. OBJETIVOS

II.1 Objetivo general

- ✓ Demostrar la importancia del control de calidad para garantizar el correcto funcionamiento de un equipo de radiografía general.

II.2 Objetivos específicos

- ✓ Describir las pruebas del control de calidad de un equipo de radiografía general.
- ✓ Analizar estadísticamente los resultados de los equipos de radiografía general, a los cuales se le realizó el control de calidad en los años 2016 y 2017.
- ✓ Concientizar a los profesionales de la salud que utilizan equipos de radiografía general sobre la importancia del control de calidad y de la protección radiológica.

III. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

III.1 Clasificación de la radiación

La radiación se encuentra clasificada en dos grandes categorías, ionizante y no ionizante, dependiendo de su capacidad para ionizar la materia o no respectivamente (Podgorsak, 2005, p. 5).

III.1.1 Radiación ionizante

Es aquella con suficiente energía para ionizar la materia, liberando los electrones del átomo; ya sea directamente o indirectamente. Según Dance (2014, p. 3) se divide en:

- **Radiación directamente ionizante:** Son partículas rápidas cargadas que depositan su energía directamente en la materia, a través de muchas pequeñas interacciones coulombianas con los electrones orbitales a lo largo del camino de la partícula. Como ejemplos tenemos a los electrones, partículas alfa e iones pesados.
- **Radiación indirectamente ionizante:** Son fotones de rayos x o gamma que primero transfieren su energía a partículas rápidas cargadas liberadas en una o varias interacciones de la materia atravesada por el cual ellos pasan. El resultado son partículas rápidas cargadas que depositan su energía directamente en la materia, es decir este proceso se realiza en dos pasos. Son partículas neutras como fotones (rayos x o rayos gamma) y neutrones.

III.1.2 Tipos de fotones de radiación indirectamente ionizante

Dependiendo de su origen, según Podgorsak (2005, p. 26) los fotones de radiación indirectamente ionizante caen dentro de una de las siguientes cuatro categorías:

- **Bremsstrahlung o Radiación de frenado (rayos x continuo):** Emitidos a través de la interacción entre el electrón y el núcleo.
- **Rayos x característicos (discreto):** Emitidos en las transiciones de electrones orbitales, desde una órbita permitida a una vacancia de otra órbita permitida.
- **Rayos γ (discreto):** Emitidos a través de transiciones nucleares en el decaimiento γ .
- **Radiación de aniquilación (discreto, comúnmente 0.511 MeV):** Emitidos a través de una aniquilación positrón-electrón.

III.2 Interacción de la materia con los fotones

Las interacciones de las radiaciones como fotones son estocásticas y obedecen las leyes del azar. Los fotones pueden someterse a varias posibles interacciones con los átomos de un atenuador; la probabilidad o sección eficaz para cada interacción depende de la energía $h\nu$ del fotón y del número atómico Z del atenuador (Podgorsak, 2005, p. 28). En las interacciones de los fotones con la materia se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las interacciones de los fotones pueden ser de tres posibilidades: con un electrón fuertemente ligado es decir con un átomo como un todo (efecto fotoeléctrico, dispersión coherente), con el campo del núcleo (producción de pares) o con esencialmente un electrón orbital libre (efecto Compton, producción triple).

- En el contexto de las interacciones de los fotones, un electrón fuertemente ligado es un electrón orbital con una energía de enlace del orden de, o un poco más grande que, la energía del fotón, mientras que un electrón libre es un electrón con una energía de enlace que es mucho más pequeño que la energía del fotón.
- Durante la interacción el fotón puede desaparecer completamente (efecto fotoeléctrico, producción de pares, producción triple) o puede ser dispersado coherentemente (dispersión coherente) o incoherentemente (efecto Compton).

III.2.1 Absorción fotoeléctrica

Según Dance (2014, p. 13) cuando el fotón incidente interactúa con un átomo, el cual queda en un estado excitado. El exceso de energía es liberado mediante la expulsión de un electrón enlazante con el núcleo. Este electrón es llamado fotoelectrón y deja el átomo con una energía cinética “ T ” dada por la siguiente relación:

$$T = h\nu - E_s \quad (1)$$

Donde:

E_s : Energía de enlace de una capa electrónica desde el cual el electrón vino.

h : Constante de Planck.

ν : frecuencia del fotón.

Para que la absorción fotoeléctrica se pueda hacer efectivo se requiere que la energía del fotón $h\nu$ sea mayor a la energía de enlace del electrón en esa capa (Dance, 2014, p. 13).

Según Dance (2014, p. 14) una dependencia típica de la sección eficaz por átomo “ τ ” de la absorción fotoeléctrica en el rango de energía de los fotones en el diagnóstico es dado por:

$$\tau \sim \frac{Z^4}{(h\nu)^3} \quad (3)$$

La expresión anterior indica una dependencia muy fuerte del número atómico así como una fuerte dependencia con la inversa de la energía del fotón, es decir la absorción fotoeléctrica es más probable para materiales con un número atómico grande y para fotones de baja energía.

III.2.2 Efecto Compton o dispersión Compton

Dance (2014, p. 19) indica en esta situación que se da la interacción entre la radiación electromagnética y un electrón libre y existe una transferencia de energía al electrón. Aquí se consideran al fotón y al electrón como partículas. Antes de la interacción existe un fotón incidente con energía $h\nu$ y momento $h\nu/c$ y un electrón libre, después de la interacción se genera un fotón dispersado con energía $h\nu'$ y momento $h\nu'/c$ y el electrón es dispersado con un ángulo ϕ y con una energía cinética T_e y momento p_e (ver Figura 1).

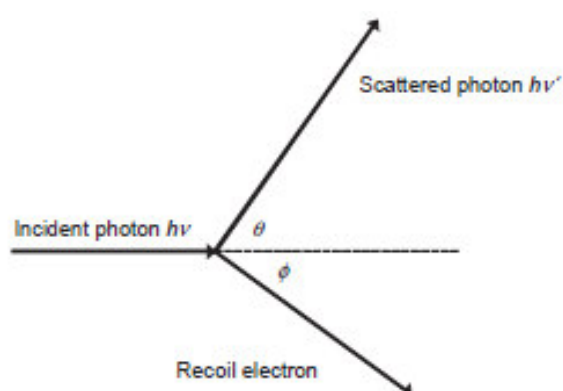


Figura 1: Geometría para la dispersión Compton.

Fuente. Dance, 2014, p. 19.

Según Dance (2014, p. 19-20) usando las leyes de conservación de la energía y del momento, se puede encontrar relaciones muy útiles, como por ejemplo:

La razón entre la energía del fotón incidente $h\nu$ y la energía del fotón dispersado $h\nu'$.

$$\frac{h\nu}{h\nu'} = \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad (4)$$

Donde:

α : razón adimensional $h\nu/m_0c^2$.

La relación entre el ángulo del fotón dispersado y el ángulo del electrón dispersado es:

$$\cot\phi = (1 + \alpha)\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (5)$$

La energía cinética del electrón dispersado está dado por:

$$T_e = h\nu - h\nu' = \frac{\alpha(1 - \cos\theta)h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad (6)$$

La sección eficaz total " σ_{KN} " Compton (probabilidad de interacción por electrón) para un fotón de energía $h\nu$ y para el rango angular de 0 a π para θ , se obtiene usando (Dance, 2014, p. 20):

$$\sigma_{KN}(h\nu) = 2\pi r_0^2 \left\{ \left(\frac{1 + \alpha}{\alpha^2} \right) \left(\frac{2(1 + \alpha)}{1 + 2\alpha} - \frac{\ln(1 + 2\alpha)}{\alpha} \right) + \frac{\ln(1 + 2\alpha)}{2\alpha} - \frac{1 + 3\alpha}{(1 + 2\alpha)^2} \right\} \quad (7)$$

Observación: Los demás efectos que se presentan en la interacción entre los fotones y la materia son: dispersión Thomson, dispersión

Coherente o dispersión Rayleigh y producción de pares. Todos los anteriores efectos contribuyen en menor manera a la imagen radiográfica en el rango de energía que se usa en el diagnóstico por imágenes.

III.3 Coeficientes de atenuación másico

Según Dance (2014, p. 25) la cantidad relativa (μ/ρ) es llamada coeficiente de atenuación másico, el cual es independiente de la densidad y del estado físico del material, es una cantidad más adecuada para compilación de datos. Posee dimensiones de m^2/kg .

III.3.1 Contribución de las interacciones individuales al coeficiente total de atenuación másico.

Los cuatro mecanismos diferentes (absorción fotoeléctrica, efecto Compton, dispersión Rayleigh y producción de pares) por los cuales los fotones pueden interactuar con la materia son considerados ahora en el coeficiente total de atenuación másico. Todos compiten, en cualquier haz de fotones todos pueden ocurrir, cada uno según su probabilidad individual. El coeficiente total de atenuación másico es por lo tanto la suma de todos los coeficientes de atenuación másico individual. La siguiente expresión muestra lo anterior (Dance, 2014, p. 26-27):

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \left(\frac{\tau}{\rho}\right) + \left(\frac{\mu_{coh}}{\rho}\right) + \left(\frac{\mu_{inc}}{\rho}\right) + \left(\frac{\kappa}{\rho}\right) \quad (8)$$

Donde:

$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)$: coeficiente total de atenuación másico.

$\left(\frac{\tau}{\rho}\right)$: coeficiente de atenuación másico del efecto fotoeléctrico.

$\left(\frac{\mu_{coh}}{\rho}\right)$: coeficiente de atenuación másico de la dispersión coherente.

$\left(\frac{\mu_{inc}}{\rho}\right)$: coeficiente de atenuación másico de la dispersión incoherente o efecto Compton.

$\left(\frac{\kappa}{\rho}\right)$: coeficiente de atenuación másico de la Producción de pares.

El tamaño de cada coeficiente de atenuación dependerá de la energía del fotón y el número atómico del material (ver Figura 2) (Dance, 2014, p. 27).

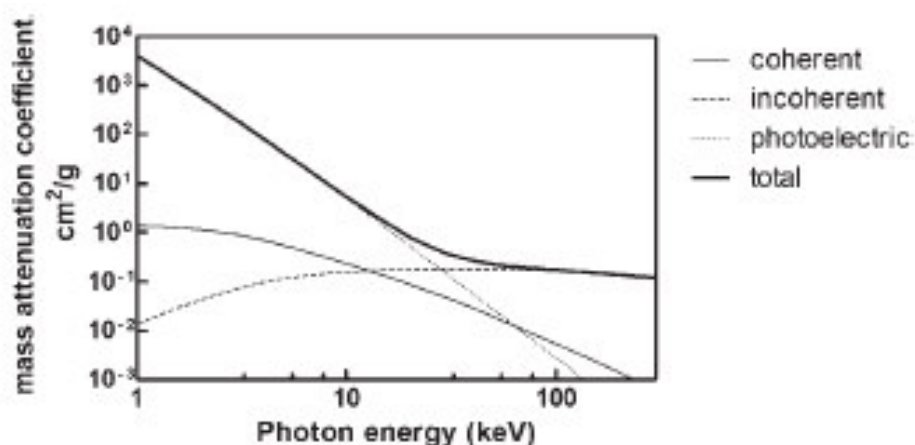


Figura 2: Coeficientes de atenuación másico para agua para fotones de energía desde 1 keV a 300 keV. Fuente. Dance, 2014, p. 27.

La contribución dominante a la sección eficaz que genera la interacción fotoeléctrica a la interacción total se da en las energías más bajas. La fuerte disminución para los fotones de baja energía es característica de la absorción fotoeléctrica y termina cuando la dispersión incoherente (Compton) se vuelve dominante, y lo sigue siendo para el resto del rango de energía de diagnóstico (Dance, 2014, p. 27).

Según Podgorsak, (2005, p. 36) la probabilidad de que un fotón se someta a cualquiera de los diversos fenómenos de interacción con un atenuador depende de la energía $h\nu$ del fotón y en el número atómico Z del material atenuante. En general, la absorción fotoeléctrica

predomina a fotones de bajas energías, el efecto Compton a energías intermedias y producción de pares a altas energías de fotones (ver Figura 3).

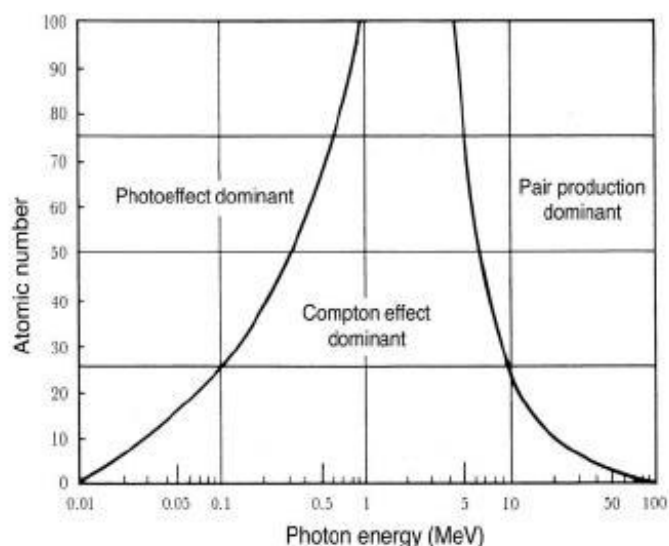


Figura 3: Regiones de predominancia relativa de las tres principales formas de interacción de los fotones con la materia.
Fuente. Podgorsak, 2005, p. 37.

III.4 Producción de rayos x

Brosed & Ruiz (2012, p. 32-33) mencionan que los rayos x se producen en un tubo de rayos x el cual posee dos partes muy marcadas:

La primera es el cátodo, posee signo negativo, componente que se caracteriza por poseer un filamento y una copa de enfoque, el primero es una aleación de tungsteno y por el cual pasa una alta corriente de electricidad ($\approx 4\text{ A}$) y como consecuencia del paso de esta corriente se produce la expulsión de los electrones, formándose un gas de electrones alrededor del filamento a este fenómeno se denomina emisión termoiónica. El segundo componente del cátodo es la copa de

enfoco y esta sirve para que los electrones que forman el gas no se dispersen, debido a la carga de mismo signo que poseen, y de lo contrario se forme un haz de electrones que se va a dirigir al ánodo e interactuar con el mismo.

La segunda es el ánodo, posee signo positivo, componente que se caracteriza por poseer un disco rotatorio (ánodo rotatorio) que está compuesto de una aleación de tungsteno. En la parte final del disco posee una pequeña angulación y es la región donde impactan los electrones, a esta zona le denomina Blanco o Diana.

Estas dos partes se encuentran dentro de una ampolla o tubo que está hecho al vacío (ver Figura 4).

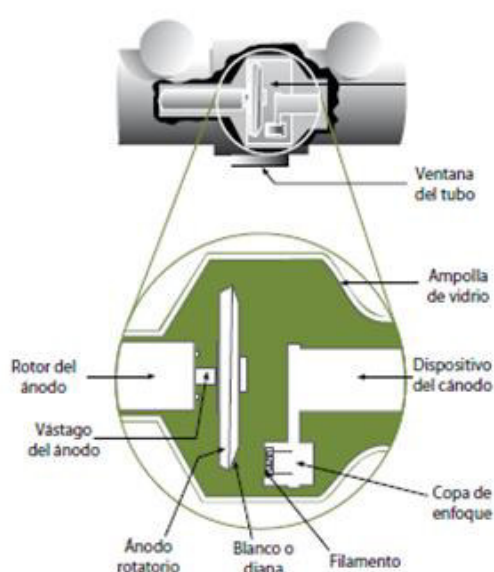


Figura 4: Esquema del interior de una ampolla de rayos x.
Fuente. Brosed & Ruiz, 2012, p. 33.

Brosed & Ruiz (2012, p. 35-36) indican que la producción de rayos se da de la siguiente manera: Después de haberse generado el gas de electrones sobre el filamento, se procede a generar una diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo, esto hace que el haz de electrones

viaje hacia el ánodo y lleguen a impactar sobre el blanco, después de la interacción con los electrones orbitales y con el núcleo atómico del blanco se producen los rayos x, específicamente se producen la radiación característica y la radiación Bremsstrahlung. La región real donde impactan los electrones se denomina foco real y después de realizar una proyección imaginaria, debido a la angulación del disco, se forma una región que se denomina foco efectivo y cada uno tiene dimensiones específicas (ver Figura 5).

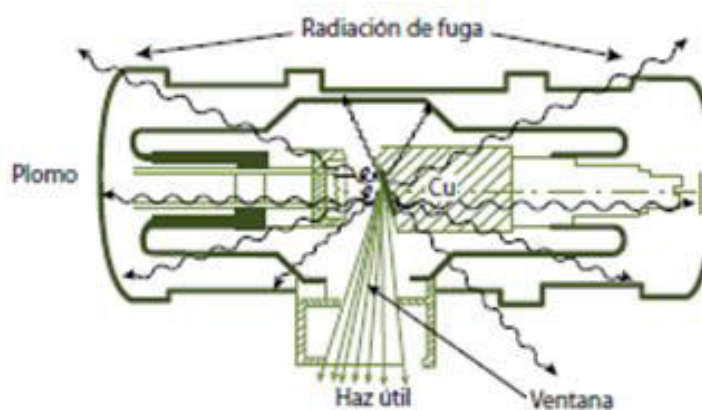


Figura 5: Esquema que muestra la producción de rayos x y por ende el haz útil y la radiación de fuga. Fuente. Brosed & Ruiz, 2012, p. 31.

III.5 Atenuación de haces de fotones

La intensidad $I(x)$ de un haz estrecho de fotones monoenergéticos, atenuados por un atenuador de espesor x , (Podgorsak, 2005, p. 26) está dado como:

$$I(x) = I(0)e^{-\mu(h\nu, Z)x} \quad (9)$$

Donde:

$I(0)$: intensidad original del haz sin atenuar;

$\mu(h\nu, Z)$: coeficiente de atenuación lineal, el cual depende del fotón de energía $h\nu$ y el número atómico Z del atenuador.

La atenuación es la reducción de la intensidad de los rayos X como consecuencia de la absorción y la dispersión (Bushong, 2010, p. 155).

La capa hemireductora (HVL o $x_{1/2}$) está definido como aquel espesor del atenuador que atenúa la intensidad del haz de fotones al 50 % de su valor original (Podgorsak, 2005, p. 27):

$$x_{1/2} = HVL = (\ln 2) / \mu \quad (10)$$

Bushong (2010, p. 155) menciona que el HVL es un indicador de la calidad del haz de rayos x, por consiguiente, HVL es una característica del haz útil de rayos x. Un equipo de radiografía general suele tener una HVL comprendida entre 3 y 5 mm de Al o entre 3 y 6 cm de tejido blando. Los rayos x de alta energía penetran más que los rayos x de baja energía. Los rayos x de 100 kV se atenúan a un ritmo de aproximadamente el 3%/cm de tejido blando, los rayos x de 10 kV se atenúan a aproximadamente el 15 %/cm de tejido blando. Asimismo los rayos x de una determinada energía son más penetrantes en un material de bajo número atómico que en un material de alto número atómico.

Se pueden utilizar métodos alternativos para determinar el HVL de un haz de rayos x. Gráficamente se puede obtener de manera directa, es decir se requiere representar gráficamente (ver figura 6) los resultados de las medidas de intensidad de los rayos x realizadas mediante un sistema experimental donde se utiliza un detector de la radiación y filtros de aluminio de diferentes espesores (ver figura 7) (Bushong, 2010, p. 155).

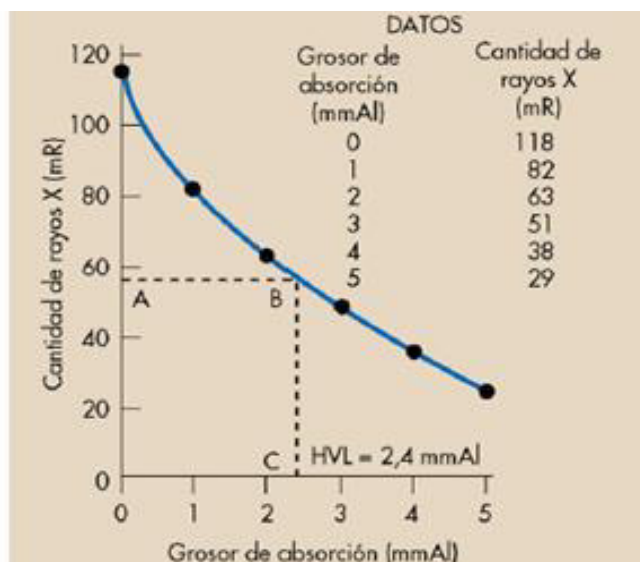


Figura 6: Representación gráfica de los resultados experimentales para obtener la capa hemireductora (CHR) o Half Value Layer (HVL). Fuente. Bushong, 2010, p. 156.

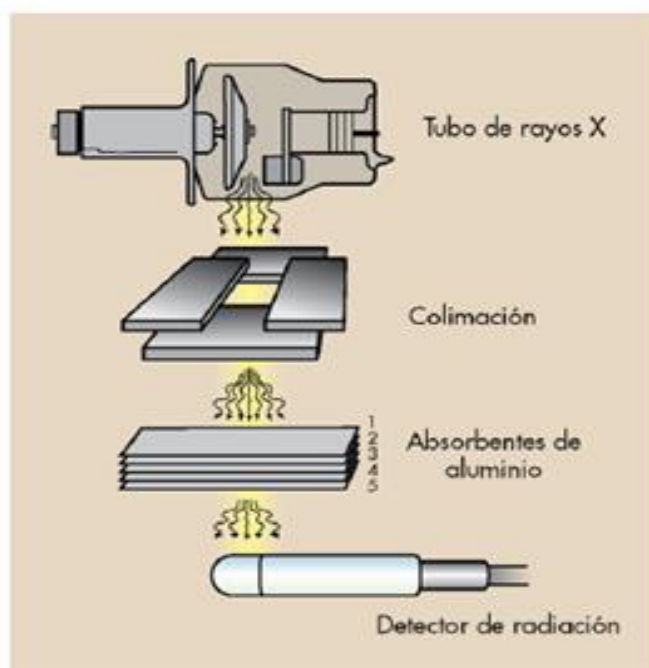


Figura 7: Esquema experimental para la determinación de la capa hemireductora (HVL). Fuente. Bushong, 2010, p. 155.

III.6 Espectro de rayos x

Dance (2010, p. 91) menciona que el espectro de emisión de un haz de rayos x es una representación gráfica de la distribución en energía de los fotones que constituyen el haz. En él se superponen el espectro continuo procedente de los fotones de la radiación de frenado y el espectro discreto generado por los fotones característicos (ver Figura 8). Los electrones se ralentizan y se detienen en el blanco, como resultado, los rayos X no se generan en la superficie sino dentro del blanco, lo que resulta en una atenuación del haz de rayos X. Esta autofiltración aparece más prominente a baja energía al final del espectro.

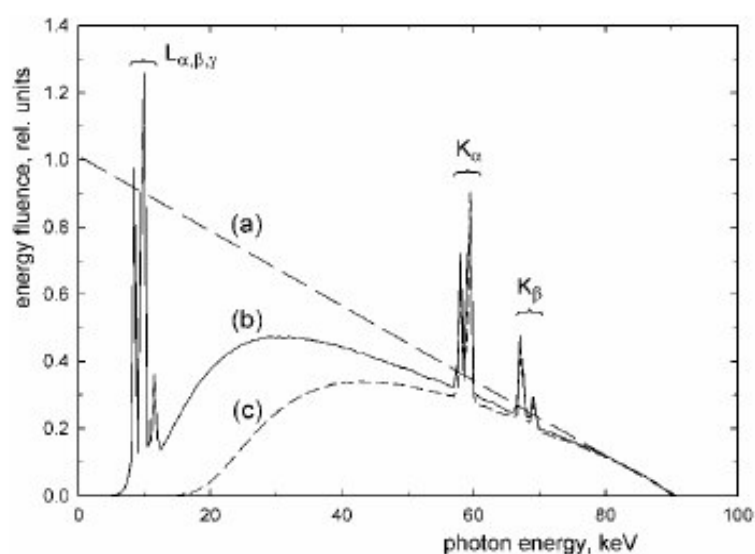


Figura 8: (a) Espectro de bremsstrahlung ideal para un ánodo de tungsteno (voltaje del tubo de 90 kV), (b) un espectro real en la salida del haz, incluidos los rayos X característicos (ángulo del ánodo 20 °, filtración inherente 1 mm Be) y (c) el espectro filtrado con un equivalente de 2,5 mm Al. Fuente. Dance, 2014, p. 92.

El conocimiento de los espectros de emisión de los rayos x es clave para comprender cómo afectan los cambios de los diferentes parámetros técnicos como son la tensión de pico, la corriente, el tiempo

y la filtración en las interacciones del haz de rayos X con los tejidos, con el receptor de imagen y, en definitiva, con cualquier material interpuesto en el mismo. Es, por lo tanto, el espectro de rayos x es como el DNI del haz de rayos x. Conociéndolo, podemos conocer cuál será la dosis absorbida en cualquier punto del paciente, cuál será la calidad de la imagen (contraste, densidad óptica o nivel de la señal, etc.), cuál será la cantidad de radiación dispersa, etc. Y así mismo, manipulándolo, podremos modificar estos últimos parámetros: dosis absorbida y calidad de imagen (Brosed & Ruiz, 2012, p. 48).

III.7 Factores que afectan el espectro de rayos x

Según Bushong (2010, p. 145) gráficamente, el número total de rayos x emitidos es equivalente al área bajo la curva del espectro de emisión de rayos x. La forma general de un espectro de emisión es siempre la misma, pero su posición relativa sobre el eje de energías puede variar. Cuanto más hacia la derecha se encuentre el espectro, mayor es la energía efectiva o calidad del haz de rayos x. Cuanto mayor sea el área bajo la curva, mayor es la intensidad o cantidad de rayos x. Existen varios factores o parámetros técnicos bajo el control del técnico radiólogo que influyen en el tamaño y la forma del espectro de emisión de rayos x y, por consiguiente, en la calidad y cantidad del haz de rayos x (ver Tabla 1).

Tabla 1: Factores que afectan al tamaño y la posición relativa de los espectros de emisión de rayos x

FACTOR	EFFECTO
Corriente del tubo	Amplitud del espectro
Voltaje del tubo	Amplitud y posición
Filtración añadida	Amplitud, más efectivo a bajas energías
Material blanco	Amplitud del espectro y posición de la línea espectral

Fuente. Bushong, 2010, p. 146.

Cuando se cambia el voltaje aplicado al tubo de rayos x, la energía máxima del espectro de rayos x se desplaza a la derecha, es decir se hace más energético (ver Figura 9) (Brosed & Ruiz, 2012, p. 48).

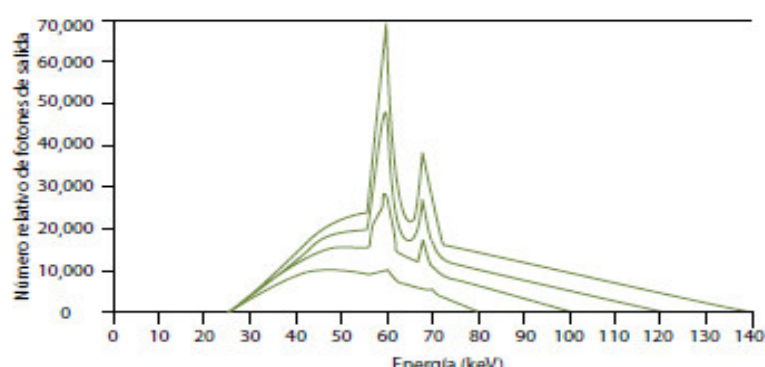


Figura 9: Espectro de rayos x generado mediante la variación del kV. Fuente. Brosed & Ruiz, 2012, p. 48.

Según Brosed & Ruiz (2012, p. 49) cuando se cambia el material del cual está fabricado el ánodo el espectro de rayos x toma una forma característica para cada material (ver Figura 10).

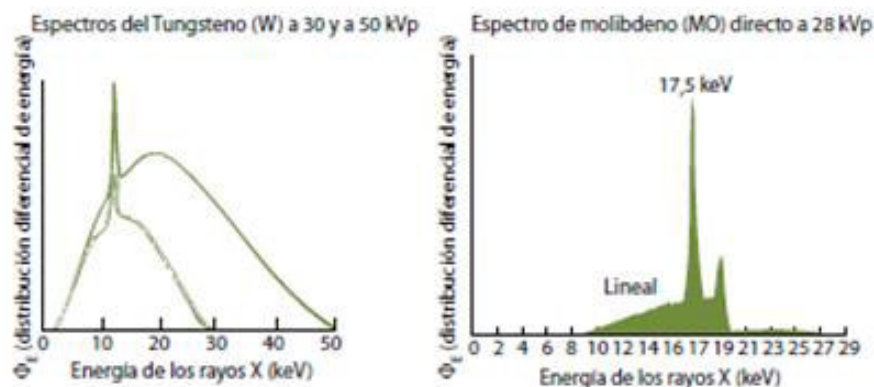


Figura 10: Espectro de rayos x generado con dos materiales distintos en el ánodo. Fuente. Brosed & Ruiz, 2012, p. 49.

III.8 Magnitudes y unidades radiológicas

Cualquier evaluación numérica de la radiación ionizante requiere la formulación de magnitudes apropiadas y esta labor es realizada de manera fundamental por la Comisión Internacional de Unidades Radiológicas (ICRU) (Brosed, 2012, p. 87).

III.8.1 Magnitudes dosimétricas

Brosed (2012, p. 102) menciona que la radiación interacciona con la materia en una serie de pasos en los que la energía se convierte, siendo la dosis absorbida el resultado de todos esos pasos. El resultado es que la energía que transporta el campo de radiación se deposita finalmente en la materia. De acuerdo a lo anterior ICRU clasifica las magnitudes dosimétricas en dos secciones tratando con la conversión de energía y con el depósito de energía (ver tabla 2).

Tabla 2: Magnitudes dosimétricas tratadas en dos contextos

Conversión de energía	Depósito de energía
- Kerma	- Depósito de energía
- Exposición	- Energía impartida
- Cema	- Energía lineal
	- Energía específica
	- Dosis absorbida

Fuente. Brosed, 2012, p. 102.

III.8.1.1 Kerma

El kerma, K , es el cociente de dE_{tr} por dm (Brosed, 2012, p. 103).

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (11)$$

Donde:

dE_{tr} es la suma de las energías cinéticas iniciales de todas las partículas iniciales de todas las partículas ionizantes cargadas liberadas por las partículas ionizantes no cargadas en un material especificado de masa dm .

Unidad: $J\ kg^{-1}$

El nombre especial para la unidad de kerma es gray (Gy) (Brosed, 2012, p. 103).

Brosed (2012, p. 102) indica que para medir el kerma, el elemento de masa debería ser tan pequeño que al introducirlo no perturbará de manera apreciable el campo de partículas ionizantes no cargadas, esta condición resulta crítica si el material en que se desea medir el kerma es diferente del medio que lo rodea. Si la

modificación del campo fuera apreciable, se debería aplicar un factor de corrección (ver Figura 11).

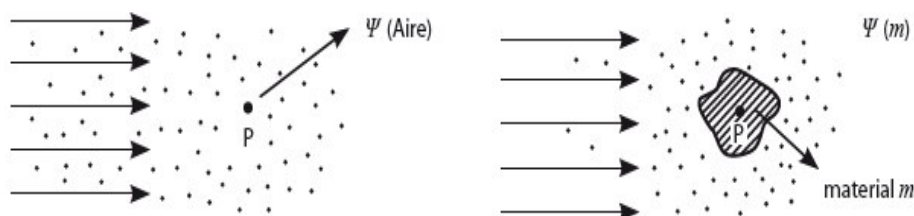


Figura 11: Paso del kerma en aire en el seno de aire al kerma en un material. Fuente. Brosed, 2012, p. 104.

Brosed (2012, p. 102) menciona que dE_{tr} es la suma de las energías cinéticas iniciales de las partículas ionizantes cargadas liberadas por las partículas ionizantes no cargadas, también se incluye en ella la energía que dichas partículas cargadas disipan en forma de radiación de frenado. Dado que el kerma incluye energía cinética recibida por las partículas cargadas, lo mismo cuando esté destinada a ser disipada por los electrones en interacciones de colisión como si son de tipo radiativo, algunos autores subdividen K en dos partes, según que la energía se disipe en las cercanías para crear excitaciones o ionizaciones (K_C) o que sea transportada más lejos por los fotones (radiación de frenado), (K_r).

$$K = K_C + K_r \quad (12)$$

Donde:

K_C : kerma de colisión

K_r : kerma radiativo

Conceptualmente el kerma se puede entender como (ver Tabla 3):

Tabla 3: Conceptualmente kerma

El kerma se define para radiación ionizante no cargada (fotones y neutrones). Es una magnitud no estocástica y función de punto.

Cuando se exprese un valor numérico es necesario señalar el material y a veces el material que lo rodea.

El kerma sirve para caracterizar indirectamente un campo de fotones en un material dado.

El kerma es una magnitud representativa de la energía transferida por unidad de masa a un punto de un material (fuente de energía).

La igualdad de la dosis absorbida y el kerma es tanto más real cuanto mejor se obtenga un equilibrio de partículas cargadas, sea despreciable la producción de radiación de frenado y la energía de las partículas no cargadas sea grande comparada con la energía de enlace de las partículas cargadas liberadas.

En ocasiones, esencialmente en el cálculo, el kerma se usa como un sustituto de la dosis absorbida. Esta práctica resulta correcta siempre y cuando no se requiera una resolución espacial mejor que el alcance de las partículas cargadas.

Fuente. Brosed, 2012, p. 105.

III.8.1.2 Tasa de kerma

La tasa de kerma, es el cociente del incremento de kerma en un intervalo de tiempo (Brosed, 2012, p. 106).

$$\dot{K} = dK/dt \quad (13)$$

Donde:

\dot{K} : tasa de kerma

dK : incremento de kerma

dt : intervalo de tiempo

Unidad: J kg⁻¹s⁻¹

El nombre especial para la unidad de tasa de kerma es Gy por segundo (Gy s⁻¹) (Brosed, 2012, p. 106).

III.8.1.3 Exposición

Según Brosed (2012, p. 106) la exposición, X , es el cociente de dQ por dm , donde, dQ es el valor absoluto de la carga total de los iones de un mismo signo producidos en el aire cuando todos los electrones o positrones liberados por los fotones en una masa dm de aire han sido detenidos por completo en el seno de aire (ver Figura 12).

$$X = dQ/dm \quad (14)$$

Unidad: C kg⁻¹

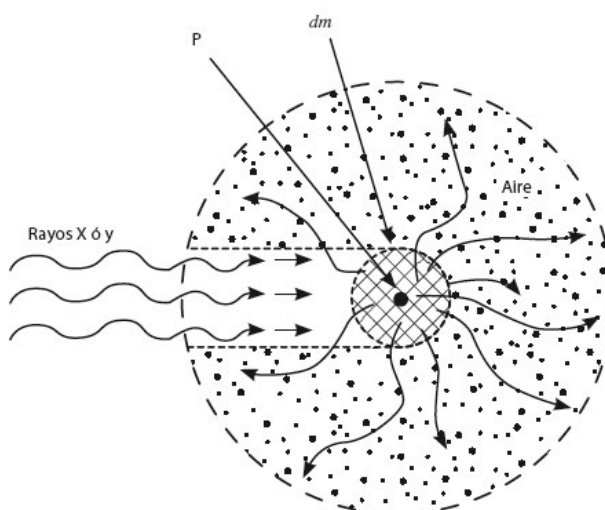


Figura 12: Descripción del sentido de la definición de exposición y de su medida asociada. Fuente. Brosed, 2012, p. 107.

Conceptualmente la exposición se puede entender como (ver Tabla 4):

Tabla 4: Conceptualmente la exposición

La exposición se define exclusivamente para fotones (radiación X y gamma) y en un medio específico como es el aire. En consecuencia su aplicación es más restrictiva que la del kerma. Es una magnitud no estocástica y función de punto.

La exposición es esencialmente una medida del poder ionizante en aire de un campo o haz de fotones. Históricamente ha sido siempre una magnitud de paso hacia la magnitud de interés, es decir la dosis absorbida en un material de interés, m . La secuencia de paso ha sido la clásica:

$$X \rightarrow K_{air} \rightarrow K_m \rightarrow D_m$$

Su definición implica una situación ideal, de modo que su medida sería imposible a menos que estuviera establecido un equilibrio de partículas cargadas (equilibrio electrónico) en el volumen correspondiente a la masa de aire objeto de la definición, al menos con aproximación suficiente.

El requerimiento de existencia de equilibrio electrónico en el volumen de medida se extiende por supuesto a cualquier instrumento de campo basado en una cámara de ionización y mida carga o corriente (pared o espesor suficiente de equilibrio).

Fuente. Brosed, 2012, p. 110 - 111.

III.8.1.4 Tasa de exposición

La tasa de exposición, \dot{X} , es el cociente de dX por dt , donde dX es el incremento de exposición en el intervalo de tiempo dt . (Brosed, 2012, p. 112)

$$\dot{X} = dX/dt \quad (15)$$

Unidad: C kg⁻¹ s⁻¹

III.8.1.5 Depósito de energía

Brosed (2012, p. 116) hace referencia que el depósito de energía, ϵ_i , es la energía depositada en una única interacción, i , luego define como:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{in} - \varepsilon_{out} + Q \quad (16)$$

Donde:

ε_{in} : Energía de la partícula ionizante que incide (excluyendo la energía en reposo).

ε_{out} : Suma de las energías de todas las partículas ionizantes que abandonan la interacción (excluyendo la energía en reposo).

Q : es el cambio en las energías en reposo de los núcleos y de todas las partículas envueltas en la interacción ($Q > 0$: decrecimiento de la energía en reposo; $Q < 0$: incremento de la energía en reposo).

Unidad: J

Observación: ε_i se puede considerar como la energía depositada en el punto de interacción, el cual se denomina punto de transferencia, es decir, el lugar donde una partícula ionizante pierde energía cinética (Brosed, 2012, p. 116).

III.8.1.6 Energía impartida

Brosed (2012, p. 117) hace referencia que la energía impartida, ε , a la materia en un volumen dado, es la suma de todos los depósitos de energía “ ε_i ” en ese volumen, luego define ε como:

$$\varepsilon = \sum_i \varepsilon_i \quad (17)$$

Unidad: J

Si la energía impartida a la materia en un volumen dado es debida a un único suceso, es igual a la suma de los depósitos de energía en el volumen asociado con ese suceso. Si la energía impartida a la materia en un volumen dado es debida a varios sucesos, es

igual a la suma de las energías impartidas individuales a la materia en el volumen, debidas a cada suceso (Brosed, 2012, p. 117).

Observación: La energía impartida media, $\bar{\varepsilon}$, a la materia en un volumen dado es igual a la energía radiante, R_{in} , de todas las partículas ionizantes cargadas y no cargadas que entran en el volumen menos la energía radiante, R_{out} , de todas aquellas partículas ionizantes cargadas y no cargadas que abandonan el volumen, más la suma, ΣQ , de todos los cambios de la energía en reposo de núcleos y partículas elementales que ocurren en el volumen ($Q > 0$ si decrece la energía en reposo ; $Q < 0$ si incrementa la energía en reposo), luego $\bar{\varepsilon}$ se define como (Brosed, 2012, p. 117):

$$\bar{\varepsilon} = R_{in} - R_{out} + \sum Q \quad (II.18)$$

III.8.1.7 Dosis absorbida

Brosed (2012, p. 120) menciona que la dosis absorbida, D , en un medio es el cociente de $d\bar{\varepsilon}$ por dm , donde $d\bar{\varepsilon}$ es la energía media impartida por la radiación ionizante a un material de masa dm y matemáticamente se expresa como:

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm} \quad (19)$$

Unidad: $J \text{ kg}^{-1}$

El nombre especial para la unidad de dosis absorbida es gray (Gy) (Brosed, 2012, p. 120).

Conceptualmente la dosis absorbida se puede entender como (ver Tabla II.5):

Tabla 5: Conceptualmente dosis absorbida

La dosis absorbida es una magnitud no estocástica y función de punto, es la más importante de las magnitudes dosimétricas. Es válida para partículas de todo tipo.

Cuando se da un valor de D , es menester especificar la clase de material al que se aplica.

Fuente. Brosed, 2012, p. 120.

III.8.1.8 Tasa de dosis absorbida

La tasa de dosis absorbida, \dot{D} , es el cociente de dD por dt , donde dD es el incremento de dosis absorbida en el intervalo de tiempo dt (Brosed, 2012, p. 120).

$$\dot{D} = dD/dt \quad (20)$$

Unidad: $\text{J kg}^{-1}\text{s}^{-1}$

El nombre especial para la unidad de tasa de dosis absorbida es gray por segundo (Gy s^{-1}) (Brosed, 2012, p. 120):

Observación: El kerma y la dosis absorbida se parecen tanto más cuanto mejor establecido está el equilibrio de partículas cargadas, es decir se genere el “Equilibrio electrónico” el cual se produce cuando las partículas cargadas que escapan del volumen en consideración son reemplazadas por partículas cargadas que provienen del material de similar características que rodea el volumen inicial, y cuanto menos importante es la producción de radiación de frenado (ver Figura 13) (Brosed, 2012, p. 121).

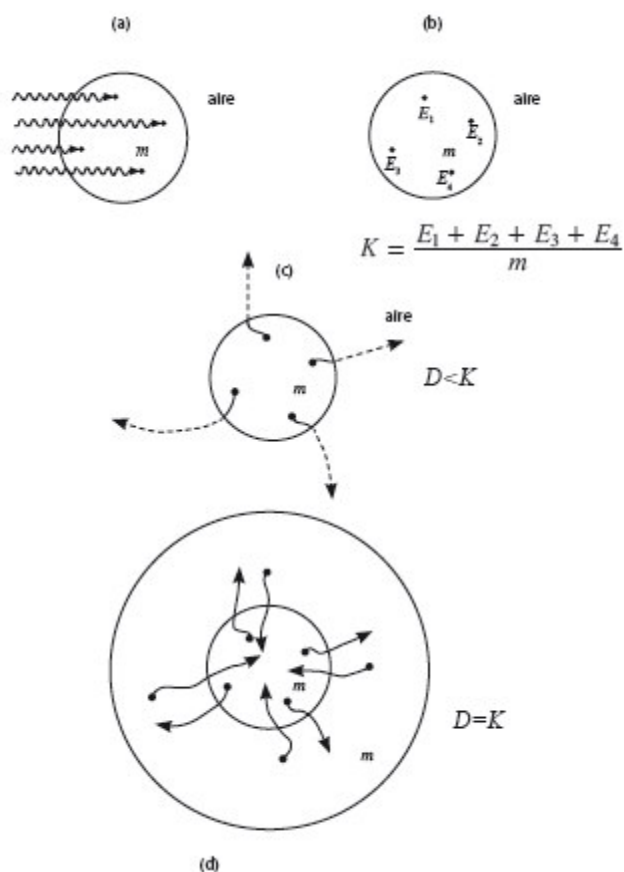


Figura 13: Ilustración simplificada de los conceptos de kerma (energía transferida) (a) (b) y de dosis absorbida (energía impartida) y de su relación (c) (d). Fuente. Brosed, 2012, p. 121.

III.8.2 Radiodiagnóstico convencional

Brosed & Ruiz (2012, p. 260) indica que en radiodiagnóstico, se utiliza el kerma a la entrada (*ESAK*), definido como el kerma en aire en el eje del haz de radiación a la distancia del foco a la piel (*DFP*) sin estar presente el paciente es decir sin retrodispersión. Las referencias de dosis en radiodiagnóstico se toman como dosis absorbida en aire en la superficie de entrada del paciente (*DSE*) que está siendo sometido a una exploración radiológica incluyendo el factor de retrodispersión (*FRD*) ($DSE = FRD \cdot \text{kerma a la entrada}$). Para las calidades de haz utilizadas en radiodiagnóstico el factor de retrodispersión que en la mayoría de los casos puede utilizarse sin error apreciable es de un valor

único medio de 1,35. Por lo tanto, la DSE se puede expresar del modo siguiente:

$$DSE(Gy) \approx 1.35 * ESAK(Gy) \quad (21)$$

Un esquema experimental para el cálculo de la *DSE* (ver Figura 14) (Brosed & Ruiz, 2012, p. 260)

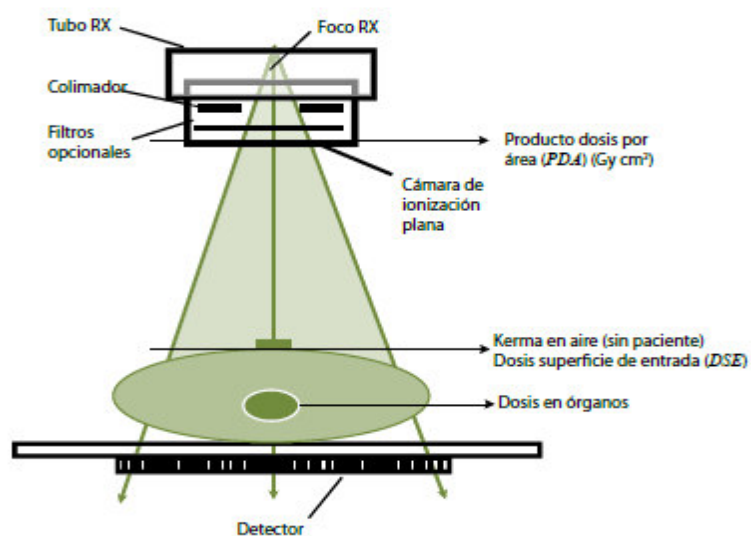


Figura 14: Esquema de las magnitudes definidas para un tubo de rayos X convencional. Fuente. Brosed & Ruiz, 2012, p. 261.

III.9 Radiobiología

Según Bushong (2010, p. 502) la radiobiología es el estudio de los efectos de las radiaciones ionizantes en los tejidos biológicos. El objetivo fundamental de la investigación radiobiológica es la descripción precisa de los efectos causados por la radiación en los seres humanos.

Se conoce fuera de toda duda que los rayos x son perjudiciales (ver Tabla 6) y el efecto de estos en el ser humano se realiza mediante

interacciones con el átomo. Estas interacciones en el aspecto atómico se dan en forma de ionización o excitación de los electrones orbitales y producen liberación de energía que se deposita en el tejido. Este depósito de energía puede provocar un cambio molecular cuyas consecuencias pueden medirse si la molécula afectada es decisiva, estos cambios se dan mediante una serie de acontecimientos que suceden entre la exposición a la radiación y el daño corporal resultante (ver Figura 15) (Bushong, 2010, p. 501).

Tabla 6: Poblaciones humanas en las que se han observado efectos radiactivos

Radiólogos norteamericanos	Leucemia, disminución de la esperanza de vida
Supervivientes a bombas atómicas	Neoplasias
Víctimas de accidentes radiactivos (p. ej., Chernóbil)	Mortalidad aguda
Habitantes de las islas Marshall	Cáncer de tiroides
Mineros de uranio	Cáncer de pulmón
Pintores de esferas de reloj	Cáncer óseo
Pacientes tratados con I^{131}	Cáncer de tiroides
Niños tratados por hiperplasia tímica	Cáncer de tiroides
Niños de Bielorrusia (expuestos al viento de Chernóbil)	Cáncer de tiroides
Pacientes con espondilitis anquilosante	Leucemia
Pacientes sometidos a pruebas radiológicas con thorotrast	Cáncer hepático
Radiación durante el embarazo	Neoplasias en la infancia
Convictos voluntarios	Infertilidad
Trabajadores del ciclotrón	Cataratas

Fuente. Bushong, 2010, p. 502.

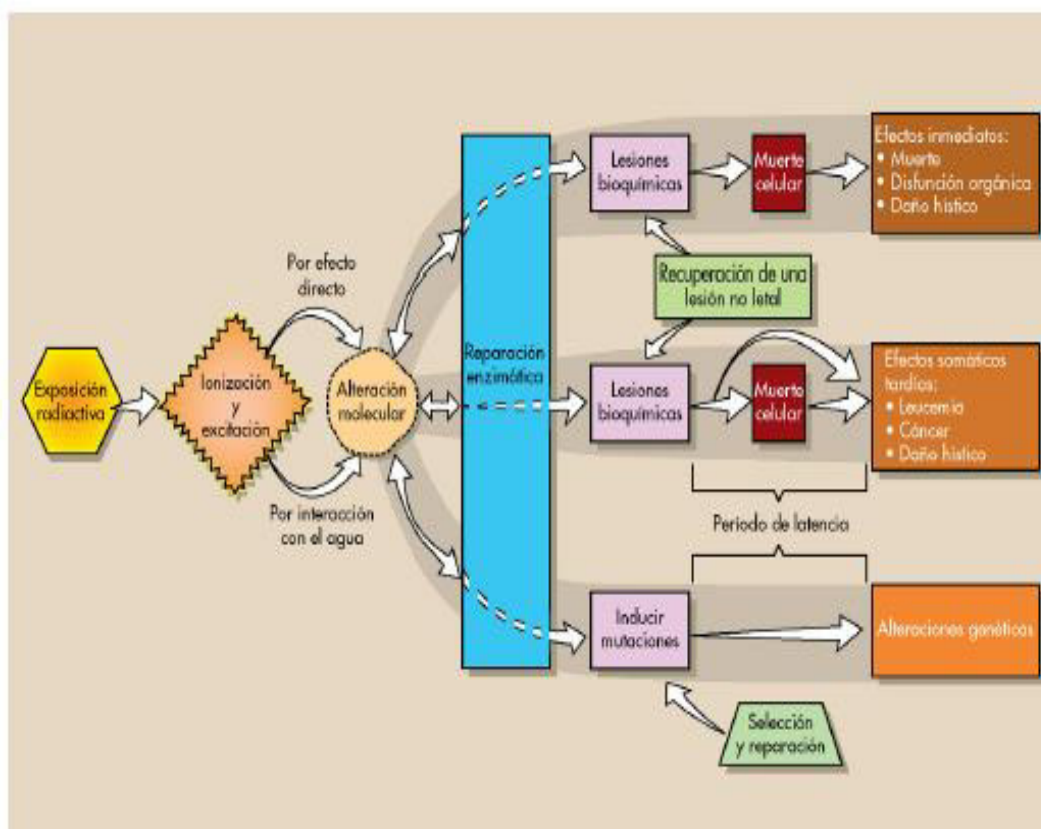


Figura 15: Secuencia de acontecimientos que pueden suceder después de la exposición a la radiación de un tejido biológico.
Fuente. Bushong, 2010, p. 501.

Bushong (2010, p. 502) nos indica que una clasificación general esquemática de una posible respuesta humana temprana o tardía a la radiación se puede encontrar de manera ordenada (ver Tabla 7). La mayoría de respuestas en los seres humanos han sido observadas tras grandes dosis de radiación. Pero incluso pequeñas dosis son dañinas.

Tabla 7: Respuesta humanas a la radiación ionizante

EFFECTOS INMEDIATOS DE LA RADIACIÓN EN HUMANOS	<ol style="list-style-type: none"> 1. Síndrome de radiación aguda: <ol style="list-style-type: none"> a. Síndrome hematológico. b. Síndrome gastrointestinal. c. Síndrome del sistema nervioso. central. 2. Lesión hística local: <ol style="list-style-type: none"> a. Piel. b. Gónadas. c. Extremidades. 3. Depresión hematológica. 4. Lesión citogenética.
EFFECTOS TARDÍOS DE LA RADIACIÓN EN HUMANOS	<ol style="list-style-type: none"> 1. Leucemia. 2. Otras enfermedades malignas: <ol style="list-style-type: none"> a. Cáncer óseo. b. Cáncer de pulmón. c. Cáncer de tiroides. d. Cáncer de mama. 3. Lesión hística local: <ol style="list-style-type: none"> a. Piel. b. Gónadas. c. Ojos. 4. Acortamiento de la esperanza de vida 5. Lesiones genéticas: <ol style="list-style-type: none"> a. Lesión citogenética. b. Duplicación de dosis. c. Dosis significativa genéticamente.
EFFECTOS DE LA RADIACIÓN EN EL FETO	<ol style="list-style-type: none"> 1. Muerte prenatal. 2. Muerte neonatal. 3. Malformación congénita. 4. Neoplasia en la infancia. 5. Retraso en el desarrollo y en el crecimiento.

Fuente. Bushong, 2010, p. 502.

III.9.1 Aspectos biológicos cuando las dosis absorbidas son bajas

En este contexto se considera como dosis efectiva baja, muy baja y extremadamente baja a 10 mSv, 1 mSv y 0.1 mSv respectivamente (Brosed & Guirado, 2016, p. 208).

Brosed & Guirado (2016, p. 208) menciona que la radiación produce daño sobre la molécula de ADN mediante la generación de múltiples

lesiones muy próximas entre sí en el medio celular; lo cual puede comprometer seriamente la capacidad de la célula para repararlas correctamente. Además, una sola traza de radiación puede producir un conglomerado de lesiones, por consiguiente, son posibles graves efectos de la radiación aun a muy bajas dosis. Por último, no tenemos pruebas suficientes de que exista una dosis por debajo de la cual el daño producido por la radiación pueda ser reparado fielmente. El resultado nocivo final, tras el depósito de energía producido por la radiación en la célula, puede ser la muerte o una transformación compatible con su viabilidad; es decir, que la célula se reproduzca y sus descendientes también puedan hacerlo.

Según Dance (2010, p. 499) los efectos biológicos de la radiación en los seres humanos se producen en los propios individuos irradiados (efectos somáticos) o en sus descendientes (hereditario o efectos genéticos). Los efectos somáticos se dividen en efectos deterministas (también conocido como "reacciones tisulares") y efectos estocásticos, donde hereditario y genético son efectos todos de origen estocástico solamente.

III.9.1.1 Los efectos estocásticos o probabilísticos

Dance (2010, p. 499) menciona que los efectos estocásticos, son efectos probabilísticos. Esto significa que la probabilidad de que ocurra un efecto, pero no su gravedad, es una función de dosis: la probabilidad aumenta con la dosis. Se supone que estos efectos no muestran una dosis umbral por debajo de la cual no pueden ocurrir. Los principales efectos estocásticos de preocupación en los niveles típicos de radiología de diagnóstico son los cánceres y las enfermedades genéticas. Estos son exclusivamente efectos tardíos porque no aparecen hasta años después de la exposición a la radiación.

III.9.1.2 *Los efectos deterministas o no probabilísticos*

Dance (2010, p. 499) indica que los efectos deterministas son el resultado de la pérdida o daño celular inducido por la radiación. La mayoría de los órganos o tejidos del cuerpo no se ven afectados por la pérdida de unas pocas células; sin embargo, si el número de las células pérdidas son suficientemente grandes, hay daños observables y, por lo tanto, pérdida de tejido / función del órgano. Por encima de un nivel particular de dosis, la llamada dosis umbral, la gravedad del efecto aumenta necesariamente con el aumento de la dosis. Este umbral varía de un efecto a otro. Los efectos deterministas pueden ocurrir unas pocas horas o días después de la exposición o puede requerir meses o años antes de la expresión.

Brosed & Guirado (2016, p. 209) indica que el daño resulta de la muerte de un conjunto de células, de manera que en este caso sí existe una dosis umbral por debajo de la cual el número de células afectadas es insuficiente para que ocurra efecto determinista alguno. Este umbral depende del tipo de lesión que estemos observando e incluso de la sensibilidad de los métodos usados para su detección. Puesto que el número de células afectadas está relacionado con la dosis, en este tipo de efectos la gravedad aumenta con la dosis absorbida.

Observación: La clasificación de los efectos de las radiaciones ionizantes en estocásticos y deterministas permite establecer criterios de Protección radiológica generales; por un lado, tendremos que limitar las dosis por debajo de los valores umbral que producen efectos deterministas; por otro, es necesario reducir los valores de dosis bajas, tanto como sea posible, para disminuir la incidencia de efectos estocásticos (Brosed & Guirado, 2016, p. 209).

III.9.2 Relación dosis-respuesta para efectos estocásticos

La información que se posee sobre la incidencia de efectos estocásticos en función de la dosis es incompleta, todo lo contrario en relación a los efectos deterministas. En general, los datos estadísticamente significativos sobre probabilidad de efectos estocásticos están en un rango de dosis que excede al de interés en protección radiológica. Esto quiere decir que la información sobre el tramo inicial de la relación dosis-respuesta para efectos estocásticos es insuficiente (Brosed & Guirado, 2016, p. 219).

Según Brosed & Guirado (2016, p. 219-220) menciona que se presentan tres modelos posibles para la relación dosis-respuesta (ver Figura 16).

- Modelo lineal sin umbral, esto es, para dosis nula la incidencia del efecto es nula (por encima del nivel de referencia que este efecto presenta sin considerar la radiación).
- Modelo lineal con umbral, el efecto solo se presenta por encima de una dosis determinada.
- Modelo “en forma de U” (o “J”) que refleja la hipótesis de la hormesis por radiación, es decir, una dosis baja reduce la incidencia del efecto por debajo de los niveles normales. En este caso la radiación ejercería una acción protectora para dosis suficientemente bajas.

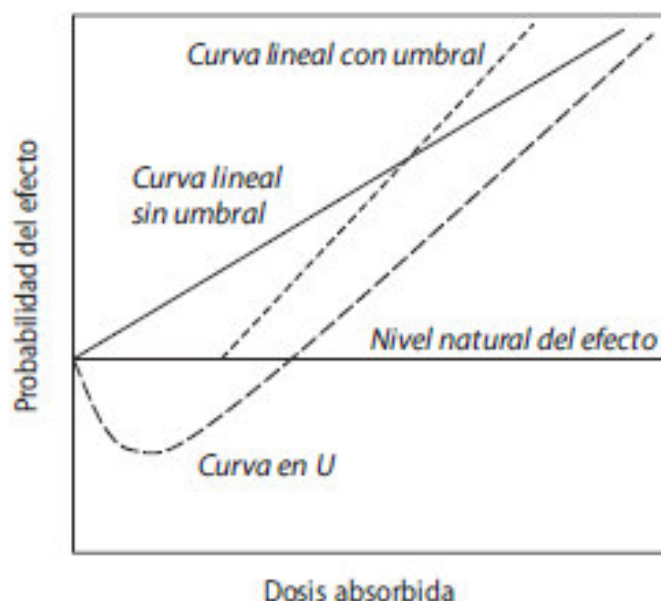


Figura 16: Curvas esquemáticas de incidencia frente a dosis absorbida para efectos estocásticos. Se presentan tres posibilidades: lineal sin umbral, lineal con umbral y curva “en U” (“o en J”) Fuente. Brosed & Guirado, 2016, p. 220.

En la actualidad se asume que la relación dosis-respuesta es lineal y no tiene umbral para bajas dosis. Esto significa que cualquier exposición a la radiación, por pequeña que sea, produce un riesgo. La elección de este modelo es consistente con los datos sobre el mecanismo de daño del ADN posible a muy bajas dosis. (Brosed & Guirado, 2016, p. 220).

III.10 Protección radiológica

La protección radiológica es la disciplina que estudia los efectos de las dosis producidas por las radiaciones ionizantes y los procedimientos para proteger a los seres vivos de sus efectos nocivos, siendo su objetivo principal los seres humanos. La protección radiológica se basa en tres principios: Justificación, Optimización y Limitación. Los mismos

se encuentran explicados en las Normas Básicas de Seguridad (NBS) del IAEA.

III.10.1 Principios fundamentales de la protección radiológica

La protección radiológica se basa en tres principios fundamentales los cuales son: Justificación de las prácticas, Optimización de la protección y seguridad y Limitación de dosis.

Justificación.- Se refiere a que si no habrá beneficio; no se justifica en lo absoluto, el empleo de las radiaciones ionizantes y todas las aplicaciones han de estar justificadas. Esto implica que: todas, incluso las exposiciones más pequeñas son potencialmente dañinas y el riesgo ha de ser compensado por los beneficios. La evaluación de los riesgos requiere el conocimiento de las dosis recibidas por las personas. Todos los exámenes radiográficos deben de estar justificados y el responsable principal es el prescriptor del examen que solicita el mismo después de realizar una evaluación previa de los beneficios y riesgos para el paciente. (NBS part. 3, 2016, p. 84)

“3.155. Las exposiciones médicas se justificarán sopesando, por una parte, los beneficios de diagnóstico o terapéuticos que se prevé obtener de ellos y, por otra, el detrimento por la radiación que podrían causar, teniendo en cuenta los beneficios y riesgos de técnicas alternativas disponibles que no entrañan exposición médica.” (NBS part. 3, 2016, p. 84-85).

“3.157. La justificación de la exposición médica de un paciente se realizará en consulta entre el médico realizador de procedimientos radiológicos y el médico prescriptor, según proceda, teniendo en cuenta, en particular en el caso de las pacientes embarazadas o

lactantes o de los pacientes pediátricos, lo siguiente (NBS part. 3, 2016, p. 85):

- a) la idoneidad de la solicitud;
- b) la urgencia del procedimiento radiológico;
- c) las características de la exposición médica;
- d) las características del paciente;
- e) la información pertinente de los procedimientos radiológicos anteriores del paciente.”

Optimización.- Si se van a emplear radiaciones ionizantes en el diagnóstico de los pacientes, entonces durante la exposición se debe minimizar cualquier posibilidad de detrimento. Optimización implica “hacer lo mejor posible bajo las condiciones imperantes”, es necesario dominar técnicas, procedimientos y opciones para optimizar la aplicación de las radiaciones ionizantes, es decir la exposición a las radiaciones debe ser la menor posible, teniendo en cuenta factores económicos y sociales, claro está sin descuidar la calidad diagnóstica del examen radiográfico (NBS part. 3, 2016, p. 86). Para optimizar el uso de los rayos x en pacientes el organismo recomienda lo siguiente:

“3.163. En el caso de los procedimientos radiológicos de diagnóstico y los procedimientos de intervención guiados por imágenes, el médico realizador de procedimientos radiológicos, en cooperación con el tecnólogo radiológico y el físico médico, y, si procede, con el radiofarmacéutico o radioquímico, garantizará el uso de los siguientes elementos (NBS part. 3, 2016, p. 86-87):

- a) el equipo radiológico médico y los programas informáticos apropiados y, en el caso de la medicina nuclear, los radiofármacos apropiados;

- b) las técnicas y los parámetros apropiados para someter al paciente a una exposición médica que sea la mínima necesaria para cumplir el objetivo clínico del procedimiento radiológico, teniendo en cuenta las normas pertinentes relativas a la calidad aceptable de la imagen establecidas por los órganos profesionales competentes y los niveles de referencia diagnósticos pertinentes establecidos de acuerdo con los párrs. 3.148 y 3.169.”

“3.168. Los titulares registrados y los titulares de licencias velarán por qué un físico médico efectúe la dosimetría de los pacientes y consigne los resultados correspondientes, o porque todo ello se realice bajo la supervisión de un físico médico, utilizando dosímetros calibrados y justándose a los protocolos aceptados a nivel internacional o nacional, así como la dosimetría para determinar lo siguiente (NBS part. 3, 2016, p. 88-89):

- a) en el caso de los procedimientos radiológicos con fines de diagnóstico, las dosis típicas que reciben los pacientes en procedimientos comunes;
- b) en procedimientos de intervención guiados por imágenes, las dosis típicas que reciben los pacientes;
- c) en el caso de los procedimientos radiológicos terapéuticos, las dosis absorbidas en el volumen blanco de planificación de cada paciente sometido a tratamiento de radioterapia externa y/o braquiterapia y las dosis absorbidas en los tejidos u órganos pertinentes, según determine el médico realizador de procedimientos radiológicos;
- d) en el caso de procedimientos radiológicos terapéuticos con fuentes no selladas, las dosis absorbidas típicas que reciben los pacientes.”

Límites de dosis.- Se refiere al cumplimiento de los límites establecidos por las Normas Básicas Internacionales de

Seguridad para la protección contra la radiación ionizante y para la seguridad de las fuentes de radiación (NBS) y por el Reglamento de Seguridad Radiológica de la normativa nacional. Los límites de dosis se aplican con el objetivo de impedir la ocurrencia de efectos indeseados inmediatos y minimizar la probabilidad de aparición de efectos a largo plazo. La limitación de dosis no aplica a las exposiciones médicas sin embargo la justificación y la optimización resultan cruciales para este caso (NBS part. 3, 2016, p. 40).

“3.27. El gobierno o el órgano regulador determinarán las restricciones adicionales, de haberlas, que los titulares registrados y los titulares de licencias deben cumplir para asegurar que no se sobrepasen los límites de dosis especificados en el apéndice III (ver Tabla 8) a causa de posibles combinaciones de dosis recibidas de exposiciones debidas a distintas prácticas autorizadas.” (NBS part. 3, 2016, p. 40-41).

“3.28. Los titulares registrados y los titulares de licencias velarán por que las exposiciones de personas debidas a las prácticas para las cuales los titulares registrados y los titulares de licencias están autorizados se limiten de manera que ni la dosis efectiva ni la dosis equivalente a los tejidos o los órganos sea superior a ningún límite de dosis pertinente especificado en el apéndice III (ver Tabla 8)” (NBS part. 3, 2016, p. 41).

Tabla 8: Límites de dosis especificados en las Normas Básicas de Seguridad del IAEA

Apéndice III - LÍMITES DE DOSIS PARA SITUACIONES DE EXPOSICIÓN PLANIFICADAS EXPOSICIÓN OCUPACIONAL

III.1. Para la exposición ocupacional de trabajadores mayores de 18 años, los límites de dosis son:

- a) una dosis efectiva de 20 mSv anuales promediada durante cinco años consecutivos (100 mSv en 5 años) y de 50 mSv en un año cualquiera;
- b) una dosis equivalente en el cristalino de 20 mSv anuales promediada durante cinco años consecutivos (100 mSv en 5 años) y de 50 mSv en un año cualquiera;
- c) una dosis equivalente en las extremidades (manos y pies) o en la piel de 500 mSv en un año.

III.3. Para la exposición del público, los límites de dosis son:

- a) una dosis efectiva de 1 mSv en un año;
- b) en circunstancias especiales, podría aplicarse un valor más elevado de dosis efectiva en un solo año, siempre que el promedio de la dosis efectiva durante cinco años consecutivos no exceda de 1 mSv por año;
- c) una dosis equivalente en el cristalino de 15 mSv en un año;
- d) una dosis equivalente en la piel de 50 mSv en un año.

Fuente. NBS part. 3, 2016, p. 142-143

III.10.1.1 Niveles orientativos de dosis

Son valores de dosis que sirven como referencia para algunos exámenes radiográficos y que permiten considerar si la práctica es realizada dentro de los parámetros de buenas prácticas (ver Tabla 9) (ARCAL XLIX, 2001, p. 25-26).

Tabla 9: Niveles orientativos de dosis aplicables en radiografía diagnóstica a un paciente adulto típico

Examen	Proyección	Dosis de entrada en superficie por radiografía (mGy)
Columna Vertebral Lumbar	Antero Posterior (AP)	10
Columna Vertebral Lumbar	Lateral (LAT)	30
Abdomen, urografía y colecistografía intravenosas	Proyección de la articulación sacro-lumbar (ASL)	40
Abdomen, urografía y colecistografía intravenosas	AP	10
Pelvis	AP	10
Articulación de la cadera	AP	10
Tórax	Postero anterior (PA)	0.4
Tórax	Lateral (LAT)	1.5
Columna vertebral torácica	LAT	7
Columna vertebral torácica	AP	20
Cráneo	PA	5
Cráneo	LAT	3

Fuente. ARCAL XLIX, 2001, p. 25-26.

III.10.1.2 Criterio ALARA (*as low as reasonably achievable*)

El Criterio ALARA “Tan bajo como sea razonablemente posible” y seguirlo siempre significa mantener las exposiciones de radiación tan bajas como sea razonable conseguir considerando aspectos socioeconómicos y según las condiciones actuales (Bushong, 2010, p. 579).

Los beneficios de los rayos X derivados de su aplicación en el diagnóstico son enormes. Conseguir estos beneficios aplicando el criterio ALARA es competencia del técnico radiólogo, del médico radiólogo y del especialista en física médica para obtener imágenes radiológicas de alta calidad con una mínima exposición a la radiación. Esta premisa tiene la finalidad de conseguir el mayor beneficio con el más bajo riesgo tanto para el paciente como para los profesionales que realizan la exploración (Bushong, 2010, p. 598).

III.11 Equipo de radiografía general

Según Brosed & Ruiz (2012, p. 28) un equipo de radiografía general es usado para radiología general, es decir, proyecciones simples tanto de huesos como de partes blandas (tórax, abdomen, columnas, extremidades, etc.). Estos equipos tienen una utilidad muy importante en el área médica, específicamente en el área del diagnóstico por imágenes con rayos x, es por esto que ha evolucionado bastante.

Las partes básicas de un equipo de radiografía general son las siguientes (ver Figura 17): (Brosed & Ruiz, 2012, p. 30).

- Tubo de rayos x
- Consola de control
- Colimador
- Mesa de exploración
- Bucky mural
- Bucky mesa
- Receptor de imagen
- Generador o Armario eléctrico



Figura 17: Partes de un equipo de radiografía general. Fuente. https://www.google.com.pe/search?q=equipo+de+rayos+x,+partes&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjSpp-F0PvYAhVlvFMKHQzQAIYQ_AUICigB&biw=1366&bih=651#imgsrc=V8pJKFqUI3ZmAM

Existen equipos de radiografía general según el diseño de fabricación para su instalación permanente o su capacidad de traslado estos se denominan como: fijo o estacionario, rodante o rodable y portátil (ver Figura 18).



Figura 18: Equipos de radiografía general: (a) Equipo fijo. (b) Equipo rodante (c) Equipo portátil. Fuente. X RAY GROUP - <http://www.xrayperu.com.pe/xray-estacionarios.html>; <http://www.xrayperu.com.pe/xray-rodables.html>; <http://www.xrayperu.com.pe/xray-portatiles.html>

Según la modalidad del sistema de procesamiento de la imagen existen equipos de radiografía general convencional, equipo de radiografía general CR y equipo de radiografía general digital (ver Tabla 10).

Tabla 10: Equipos de radiografía general según la modalidad del sistema de procesado

TIPO	CARACTERISTICA
Radiografía General Convencional	Es la versión básica de un equipo radiografía, el cual posee como receptor de imagen un chasis (que contiene una pantalla fluorescente) y película radiográfica, las cuales posteriormente son reveladas con el uso de químicos (revelador y fijador).
Radiografía General CR	Es la versión donde el receptor de imagen o chasis contiene una pantalla de fosforo fotoestimulable, en esta pantalla después de haber sido expuesta se forma una imagen latente que se debe llevar a un digitalizador y después de un proceso computarizado (algoritmo de procesamiento de imágenes) se puede observar la imagen en la pantalla de un monitor adecuado y si se desea se puede modificar la misma para luego imprimirla.
Radiografía General Digital	Es la versión donde el receptor de imagen o chasis se denomina "Flat Panel" o "Paneles Planos" que contiene una pantalla de silicio amorfo, en esta pantalla posterior a la exposición se genera una imagen. Después de un proceso y de esperar un cierto tiempo debido al procesamiento de la imagen se puede observar la misma en la pantalla de un monitor adecuado y si se desea se puede modificar para luego imprimirla.

Fuente. Brosed & Ruiz, 2012, p. 75, 82 y 87.

III.12 Control de calidad de equipos de rayos x médico

Según Bushong (2010, p. 305) el control de calidad está diseñado para asegurar que el radiólogo dispone de una imagen óptima resultado del buen rendimiento del equipo, que se traduce en una mínima exposición del paciente a la radiación.

Según Brosed & Ruiz (2012, p. 181) el objetivo fundamental del control de calidad es el de verificar que los parámetros técnicos cumplen la normativa aplicable y que estos permitan conseguir objetivos de calidad

de imagen y de dosis al paciente. La importancia del control de calidad de los equipos de rayos x medico se enmarcan en la protección radiológica al paciente. Además el control de calidad se encarga de realizar la evaluación de parámetros técnicos, geométricos y dosimétricos de cada equipo de rayos x. Las pruebas a realizar son pruebas no invasivas, es decir no se usan equipos de medida que se conecten o perturben algún componente del equipo de rayos x médico, todo lo contrario, se usan equipos de medidas que se colocan en la dirección del haz de rayos x y que están totalmente aislado del equipo evaluado.

El Protocolo Español de Control de Calidad en Radiodiagnóstico (PECCRD 2011), muestra un listado de las pruebas de control de calidad que se deben realizar a un equipo de radiografía general. Se consideran pruebas de parámetros geométricos, calidad del haz, tiempo de exposición, rendimiento, rejilla, control automático de exposición y sistema de dosis, así como de sus tolerancias, aunque en ocasiones puede remitirse a valores dados por el fabricante (SEFM, SEPR & SERAM, 2011, p.37).

IV. MATERIAL Y MÉTODO

IV.1 Equipos de medida e instrumentos usados en el control de calidad

En cada control de calidad de un equipo de radiografía general se han usado los siguientes equipos de medida e instrumentos:

- Multianalizador de rayos x calibrado en un laboratorio primario; Marca: Radcal (ver Figura 19).
- Sensor para radiografía, rango de medida de 40 kV a 160 kV, calibrado en un laboratorio primario; Marca: Radcal (ver Figura 20).
- Computadora
- Test de colimación, debidamente acreditado. Marca: Nuclear Associates (ver Figura 21).
- Test de alineamiento, debidamente acreditado. Marca: Nuclear Associates (ver Figura 22).
- Filtros de aluminio de alta pureza y diferentes espesores (1 mm, 2 mm y de 0.1 mm) (ver Figura 23).
- Luxómetro calibrado en laboratorio acreditado por INACAL. Marca: Smart (ver Figura 24).
- Huincha (ver Figura 25).
- Nivel (ver Figura 25).
- Cinta adhesiva (ver Figura 25).



Figura 19: Multianalizador para radiografía general o también llamado digitalizador



Figura 20: Sensor para radiografía general

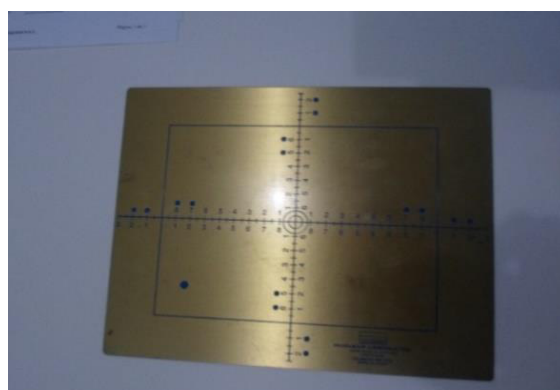


Figura 21: Test de colimación

IV.2 Pruebas realizadas en el control de calidad de un equipo de radiografía general

Las pruebas que se realizan en la evaluación de control de calidad de un equipo de radiografía general se encuentran descritas en dos protocolos de control de calidad, los cuales son los siguientes:

- Protocolo Español de Control de Calidad en Radiodiagnóstico, revisión 2011 (PECCRD 2011), publicado por la Sociedad Española de Física Médica (SEFM), Sociedad Española de Protección (SEPR) y la Sociedad Española de Radiología Médica (SERAM).
- Protocolos de Control de Calidad en Radiodiagnóstico, Proyecto ARCAL XLIX, publicado por la International Atomic Energy Agency (IAEA).

Estos dos documentos muestran además de las pruebas de control de calidad a realizar a cada equipo según su modalidad, muestran el rango de tolerancia para cada prueba. Ambos documentos poseen tolerancias diferentes para algunas de las pruebas del control de calidad.

En la empresa X RAY QUALITY CONTROL SAC se ha acordado usar como protocolo de referencia el Protocolo Español, 2011 (PECCRD 2011). En dicho documento se muestran las tablas donde se describen todas las pruebas de control de calidad que se deben de realizar a cada equipo de radiografía general, considerando su modalidad en la adquisición de imagen y a su vez se indican las tolerancias respectivas para cada prueba (ver Tabla 11 a Tabla 15).

Tabla 11: Pruebas de control de calidad y sus tolerancias – Parámetros geométricos y calidad del haz

PARÁMETRO	TOLERANCIA
PARÁMETROS GEOMÉTRICOS	
Tamaño mínimo del campo	$\leq 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ a 100 cm DFP*
Indicador de la distancia foco-detector de imagen	Diferencia entre medida e indicada $< 4 \%$
Definición del campo luminoso	Simetría: la diferencia entre las distancias desde el centro a cada uno de los bordes $< 1 \text{ cm}$. Iluminación $>$ iluminación ambiente Penumbra de bordes $< 1 \text{ cm}$, en estimación visual
Alineación y centrado campo de luz-campo de radiación-campo de registro	Alineación de RX/haz luminoso $< \pm 2 \%$ de la distancia foco-maniquí en cada dirección. Alineación campo de registro dentro del 1% de la DFP * Centrado RX/ haz luminoso $\pm 1 \%$ de la DFP*
Colimación	$< \pm 2 \%$ de la DFP* en cada dirección para sistemas automáticos
Ortogonalidad del haz de rayos X y del receptor de imagen	$\leq 1,5^\circ$
CALIDAD DEL HAZ	
Exactitud de la tensión	Desviaciones $< \pm 10 \%$
Repetibilidad y reproducibilidad de la tensión	Repetibilidad: coeficiente de variación $< 5 \%$ Reproducibilidad: coeficiente de variación $< 10 \%$
Filtración. Capa hemirreductora	$> 2,5 \text{ mm Al}$ para $\text{kV} > 70 \text{ kV}$.
Visualización de la forma de onda	Porcentaje de rizado según especificaciones del fabricante

*DFP = Distancia foco-película

Fuente. SEFM, SEPR & SERAM, 2011, p.38

Tabla 12: Pruebas de control de calidad y sus tolerancias – tiempo de exposición, rendimiento y rejilla

PARÁMETRO	TOLERANCIA
TIEMPO DE EXPOSICIÓN	
Exactitud del tiempo de exposición	Exactitud: desviaciones $< \pm 10 \%$ para tiempos > 20 ms y lo especificado por el fabricante para tiempos ≤ 20 ms
Repetibilidad y reproducibilidad del tiempo de exposición	Coeficiente de variación $< 10 \%$
RENDIMIENTO	
Valor del rendimiento	$> 25 \mu\text{Gy/mAs}$ a 80 Kv y 1 m del foco para una filtración estimada entre 2,5 y 5 mmAl. Constancia: variación $< 25 \%$
Repetibilidad del rendimiento	Coeficiente de variación $< 10 \%$
Variación del rendimiento con la corriente y con la carga	Coeficiente de linealidad $< 0,1$ Variación $< 15 \%$ para cambios de corriente Variación $< 20 \%$ para cambios de carga
REJILLA	
Factor de exposición de la rejilla	-
Estado y movimiento de la rejilla	Sin artefactos. Láminas de rejilla no visibles
Posicionamiento correcto de la rejilla	-

Fuente. SEFM, SEPR & SERAM, 2011, p.39

Tabla 13: Pruebas de control de calidad y sus tolerancias – control automático exposición (CAE) en sistemas de película-pantalla y control automático exposición (CAE) en sistemas digitales: paneles planos y radiografía computarizada (CR)

PARÁMETRO	TOLERANCIA
CONTROL AUTOMÁTICO EXPOSICIÓN (CAE) EN SISTEMAS DE PELÍCULA-PANTALLA	
Ajuste del CAE para la posición central del selector de densidades.	1,1 – 1,5 DO
Repetibilidad del CAE	Repetibilidad: CV < 10 %
Homogeneidad entre las cámaras	Desviación < $\pm 0,2$ DO*
Incremento de DO por paso del selector de densidades	Diferencia entre pasos consecutivos < 0,3 DO
Compensación del CAE para distintos espesores y diferentes tensiones	Desviación < $\pm 0,2$ DO
CONTROL AUTOMÁTICO EXPOSICIÓN (CAE) EN SISTEMAS DIGITALES: PANELES PLANOS Y RADIOGRAFIA COMPUTARIZADA (CR)	
Ajuste del CAE para la posición central del selector.	Desviación respecto del valor de referencia inicial < 20 %
Repetibilidad del CAE	Repetibilidad: CV < 10 %
Homogeneidad entre las cámaras	Según especificaciones del fabricante
Incremento de señal por paso del selector	Las diferencias entre la dosis en el receptor de imagen estimada a través del índice de exposición del sistema entre pasos consecutivos estará entre el 15 % y el 30 % salvo que el fabricante indique otro valor.
Compensación del CAE para distintos espesores y diferentes tensiones	Desviación máxima de las dosis estimadas a través del índice de exposición del sistema de imagen $\leq \pm 20$ %.

Fuente. SEFM, SEPR & SERAM, 2011, p.40.

Tabla 14: Pruebas de control de calidad y sus tolerancias – sistemas digitales de registro de panel plano

PARÁMETRO	TOLERANCIA
SISTEMAS DIGITALES DE REGISTRO DE PANEL PLANO	
Remanencia de la imagen previa	Apreciación visual: no se apreciará la imagen remanente. Diferencia de valores de píxel debe ser inferior al 5 % del valor de ruido de fondo en la imagen posterior obtenida según DG031.
Uniformidad de la imagen	Desviación VMP entre cuadrantes < 10 % Desviación RSR < 20 %
Tamaño de campo y distorsión geométrica	Desviación $\leq \pm 5 \%$ Diferencia entre distancias medidas y reales < 3 % en el centro de la imagen
Función de respuesta del detector	Según especificaciones del fabricante. $R^2 > 0,95$. Pendiente de la recta: desviación < 10 %
Ruido de fondo (“dark noise”) de los detectores	Sin artefactos en apreciación visual Constancia: desviación con respecto al valor de referencia < 50 %
Resolución espacial	Lo más próxima posible a la frecuencia de Nyquist asociada al tamaño del píxel del detector y siempre superior al 80 % de ésta.
Uniformidad de la resolución	Resolución en el centro de los cuatro cuadrantes > 90 % del obtenido en el centro de la imagen.
Umbral de sensibilidad contraste-tamaño del detalle	Según especificaciones del fabricante

Fuente. SEFM, SEPR & SERAM, 2011, p.41.

Tabla 15: Pruebas de control de calidad y sus tolerancias – sistema digitales de registro de panel plano y sistema de medida de dosis

PARÁMETRO	TOLERANCIA
SISTEMAS DIGITALES DE REGISTRO DE PANEL PLANO	
Ruido	Coef $b \approx 0,5$ en el ajuste $DTP = a(Kerma)^b$; $R^2 > 0,9$
Artefactos en la imagen	Sin artefactos
Calibración del indicador de dosis del detector	La exposición indicada y la medida deben coincidir dentro de un $\pm 20 \%$
Verificación de los elementos defectuosos del detector sin corregir	Según especificaciones del fabricante
SISTEMA DE MEDIDA DE DOSIS	
Verificación del funcionamiento del sistema de medida o estimación del producto dosis-área	Desviación $< 20 \%$

Fuente. SEFM, SEPR & SERAM, 2011, p.42.

La Oficina Técnica de la Autoridad Nacional (OTAN) del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) emitió la *norma técnica IR.003.2013 “REQUISITOS DE PROTECCION RADIOLOGICA EN DIAGNOSTICO MEDICO CON RAYOS X”*, en el cual en el anexo V se hace mención de las pruebas mínimas que se deben de realizar en el control de calidad a un equipo de radiografía general, no indican tolerancia alguna (ver Figura 26).

OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNOSTICO MEDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 17/19
---	---	------------------------------

ANEXO V

CONTROL DE CALIDAD EN DIAGNÓSTICO MÉDICO CON RAYOS X

El control de calidad se realizará siguiendo procedimientos técnicos aprobados por la OTAN, que incluirán como mínimo las siguientes pruebas:

Equipo de Radiografía

Colimación (perpendicularidad del rayo central, coincidencia de campos)
Tensión del tubo (exactitud, repetibilidad)
Tiempo de exposición (exactitud, repetibilidad)
Control automático de exposición (repetibilidad, compensación)
Rendimiento y tasa de kerma en aire (repetibilidad, linealidad)
Filtración (capa hemirreductora)
Dosis en la Superficie del Paciente (Tórax P.A. Cráneo P.A. Columna lumbar A.P.)

Figura 26: Anexo V, Control de calidad de equipo de radiografía general. Fuente. Norma técnica IR.003.2013. 2013. p. 17.

La empresa X RAY QUALITY CONTROL S.A.C. para sus pruebas de control de calidad considera la norma técnica dada por OTAN/IPEN, que es un documento legal y su cumplimiento es de carácter obligatorio en todo el territorio nacional y el Protocolo español (PECCRD 2011). La empresa realiza las pruebas de control de calidad a cada equipo cumpliendo la normativa nacional y considerando las recomendaciones internacionales, con la intención de evaluar los equipos de manera idónea y conseguir los objetivos inherentes. Las pruebas consideradas se muestran a continuación (ver Tabla 16):

Tabla 16: Pruebas de control de calidad de un equipo de radiografía general

PARAMETRO GENERAL	PARAMETRO ESPECIFICO
<i>Parámetro geométrico</i>	Tamaño mínimo de campo
	Indicador de la distancia foco-detector de imagen
	Definición del campo luminoso
	Alineación y centrado campo de luz-campo de radiación-campo de registro
	Colimación
	Ortogonalidad del haz de rayos x y del receptor de imagen
<i>Calidad del haz</i>	Exactitud de la tensión
	Repetibilidad y reproducibilidad de la tensión
	Filtración. Capa hemireductora
<i>Tiempo de exposición</i>	Exactitud del tiempo de exposición
	Repetibilidad y reproducibilidad del tiempo de exposición
<i>Rendimiento</i>	Valor del rendimiento
	Repetibilidad del rendimiento
	Variación del rendimiento con la corriente y con la carga
<i>Sistema de medida de Dosis</i>	Dosis en la superficie del paciente

Fuente. X RAY QUALITY CONTROL S.A.C.

Luego de colocar los diversos instrumentos en el esquema experimental adecuado y a una distancia de 1 m, esta distancia se considera desde el foco hasta el detector o a la superficie superior del chasis, se inicia las pruebas.

Las mismas se muestran a continuación:



Figura 27: **Prueba para verificar el tamaño mínimo de campo**

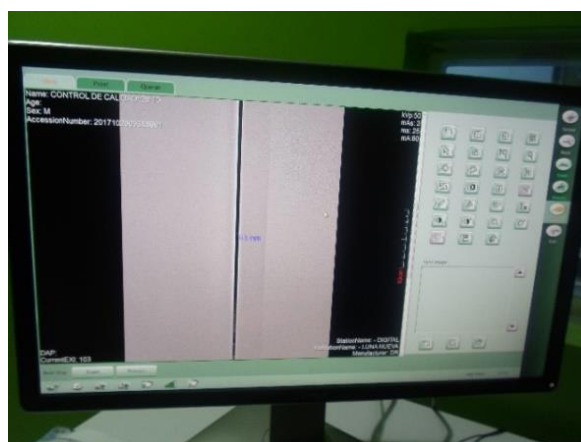


Figura 28: **Resultado después de la exposición en eje transversal del equipo de radiografía general**

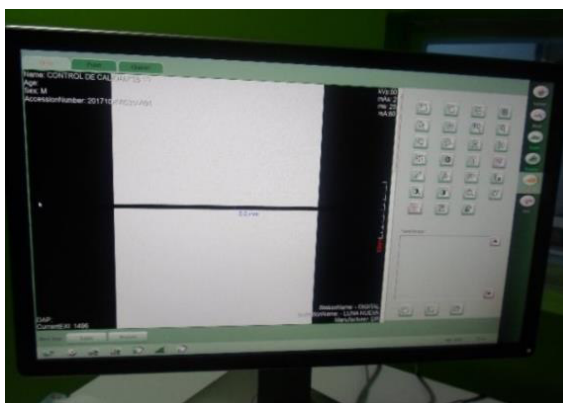


Figura 29: Resultado después de la exposición en eje longitudinal del equipo de radiografía general

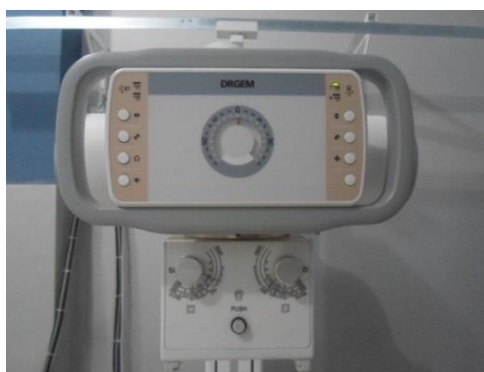


Figura 30: Prueba para verificar distancia foco – detector de imagen

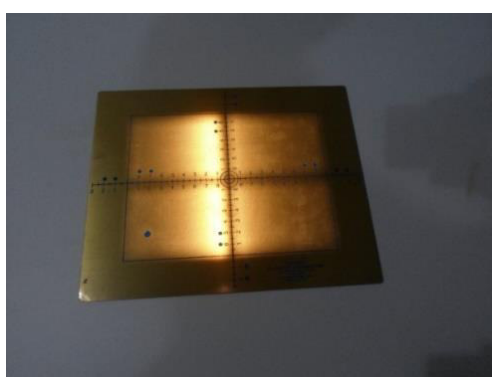


Figura 31: Prueba para verificar definición del campo luminoso, simetría y penumbra



Figura 32: Prueba para verificar definición del campo luminoso, iluminación del campo luminoso

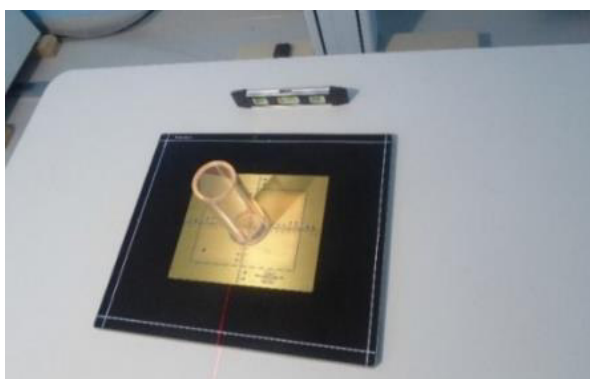


Figura 33: Prueba para verificar la alineación y el centrado del campo luz – campo de radiación y campo de registro, para verificar el sistema de colimación y para verificar la ortogonalidad del haz de rayos x y el receptor de imagen

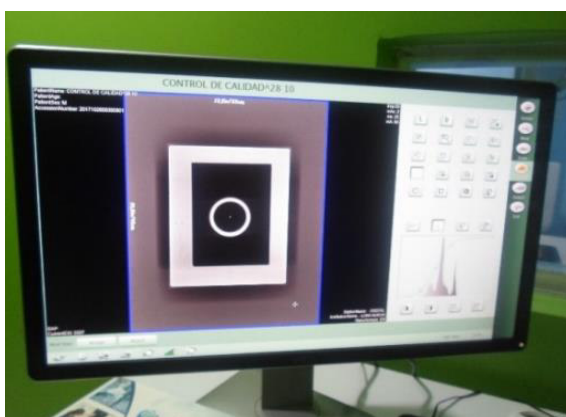


Figura 34: Resultado después de la exposición para verificar la alineación y el centrado del campo luz – campo de radiación y campo de registro, para verificar el sistema de colimación y para verificar la ortogonalidad del haz de rayos x y el receptor de imagen



Figura 35: Prueba para verificar la exactitud del tiempo de exposición y kV, reproducibilidad del tiempo de exposición y kV, valor del rendimiento, repetibilidad del rendimiento, linealidad, variación con la carga y la corriente, filtración o HVL y dosis en la superficie del paciente



Figura 36: Medidas observadas después de la exposición con una técnica radiográfica elegida



Figura 37: Prueba para verificar el valor del HVL del equipo

La empresa X RAY QUALITY CONTROL S.A.C. en el periodo 2016 – 2017 realizó un total de 275 servicios de control de calidad a equipos de radiografía general, es decir evaluó 275 equipos de rayos x. En el total se encuentran equipos de radiografía convencional, radiografía CR y radiografía digital. Los servicios fueron realizados en su mayoría en la ciudad de Lima pero también en provincias de todo nuestro país. Cabe mencionar que los servicios fueron solicitados por instituciones privadas así como instituciones estatales.

IV.3 Características de los equipos de radiografía general evaluados

Los equipos de radiografía general evaluados poseen un rango de kV máximo entre 125 – 150 kV y un rango de mA máximo entre 500 – 630 mA, algunos equipos rodantes de algunas marcas poseen solo el mAs y no indican el mA. Algunos de los equipos son estacionarios, rodantes o portátiles. Así mismo el sistema de procesamiento de la imagen es muy variado, algunos poseen un sistema de procesamiento manual, otros procesan sus imágenes con una procesadora automática, otros poseen un sistema CR es decir posee un digitalizador de imágenes y su respectiva impresora y por último también existen los sistemas digitales directos y poseen su impresora correspondiente.

IV.4 Cálculo de los parámetros de control de calidad

- **Exactitud:** es la proximidad de concordancia que existe entre el valor nominal o valor indicado (observado en el comando) en el equipo y el valor medido.

Se calcula como desvío máximo de la siguiente manera (ARCAL XLIX, 2001, p. 14):

$$Desv.(\%) = \left(\frac{L_{med} - L_{nom}}{L_{nom}} \right) \times 100 \quad (22)$$

Donde: L_{nom} es el valor nominal y L_{med} es el valor medido más discrepante.

- **Repetibilidad:** indica el grado de igualdad entre resultados obtenidos utilizando el mismo método, con el mismo instrumento de medición y con la misma técnica radiográfica.

Se calcula de la siguiente manera (ARCAL XLIX, 2001, p. 14):

$$Desv.(\%) = \left[\frac{L_{Max} - L_{Min}}{\left(\frac{L_{Max} + L_{Min}}{2} \right)} \right] \times 100 \quad (23)$$

Donde: L_{Max} y L_{Min} son los valores medidos máximos y mínimos respectivamente más discrepantes.

- **Rendimiento:** Es el kerma en aire en el seno de aire, sin retrodispersión, por unidad de carga a 80 kV y a 1 m del foco, expresada en $\mu\text{Gy/mAs}$. (Brosed y Ruiz, 2012, 188)

Se calcula de la siguiente manera:

$$R = \frac{X(\mu Gy)}{Q(mAs)} \quad (24)$$

Donde: X es el kerma en aire o exposición, medido en μGy y Q es el mAs aplicado.

- **Linealidad:** Indica el grado de proporción que existe entre los rendimientos evaluados para distintos tiempos de exposición.

Se calcula de la siguiente manera (ARCAL XLIX, 2001, p. 16):

$$L(\%) = \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right) \times 100 \quad (25)$$

Donde: R_1 y R_2 son los valores de rendimiento calculados para tiempos t_1 y t_2 .

- **HVL:** Calculo experimental de la capa hemireductora o HVL.

Se calcula de la siguiente manera (ARCAL XLIX, 2001, p. 19):

$$HVL = \left[\frac{-F \ln(2)}{\ln \frac{L}{L_0}} \right] \quad (26)$$

Donde: L es la lectura con filtro, L_0 es la lectura sin filtro y F es el espesor del filtro utilizado en mmAl.

- **Dosis de entrada en la piel del paciente:** Se utiliza el kerma a la entrada (ESAK) definido como el kerma en aire en el eje del haz de radiación, incluyendo el factor de retrodispersión igual a 1.35.

Se calcula de la siguiente manera (Brosed & Ruiz, 2012, p. 260):

$$DSE(Gy) \cong 1.35 \times ESAK (Gy) \quad (27)$$

Donde: DSE es la dosis absorbida en aire en la superficie de entrada del paciente y $ESAK$ es el kerma a la entrada en aire.

Las mediciones para obtener los parámetros geométricos se realizan directamente de las películas obtenidas.

V. RESULTADOS

Los resultados encontrados después de realizar el control de calidad a un total de 275 equipos de radiografía general, de acuerdo a las características, pruebas de control de calidad y cálculos de los parámetros de control de calidad anteriormente descritos, son los siguientes:

El número de equipos aprobados, en los cuales todos los resultados de las pruebas de control de calidad se encuentran dentro de la tolerancia establecida, hacen un total de 245 equipos de radiografía general y este valor representa el 89.1 % del total de equipos evaluados. Por ende los 30 equipos restantes no han aprobado, los cuales representan en 10.9 % y han sido observados porque el resultado de los parámetros en al menos una de las pruebas del control de calidad se encuentra fuera de la tolerancia establecida, es decir, un equipo desaprobado puede tener un resultado de la prueba o varios resultados de sendas pruebas fuera de la tolerancia establecida en el protocolo de referencia (ver Figura 38).



Figura 38: Porcentaje de equipos aprobados y desaprobados en el control de calidad

Como se mencionó anteriormente dentro de los equipos desaprobados, se pueden encontrar un resultado o varios resultados de las pruebas del control de calidad fuera de la tolerancia establecida, es decir desaprobadas, por lo tanto, algunos equipos desaprobados pueden coincidir o no en algunas pruebas desaprobadas. Considerando lo anterior, se procedió a realizar una estadística con las pruebas desaprobadas (ver Figura 39).

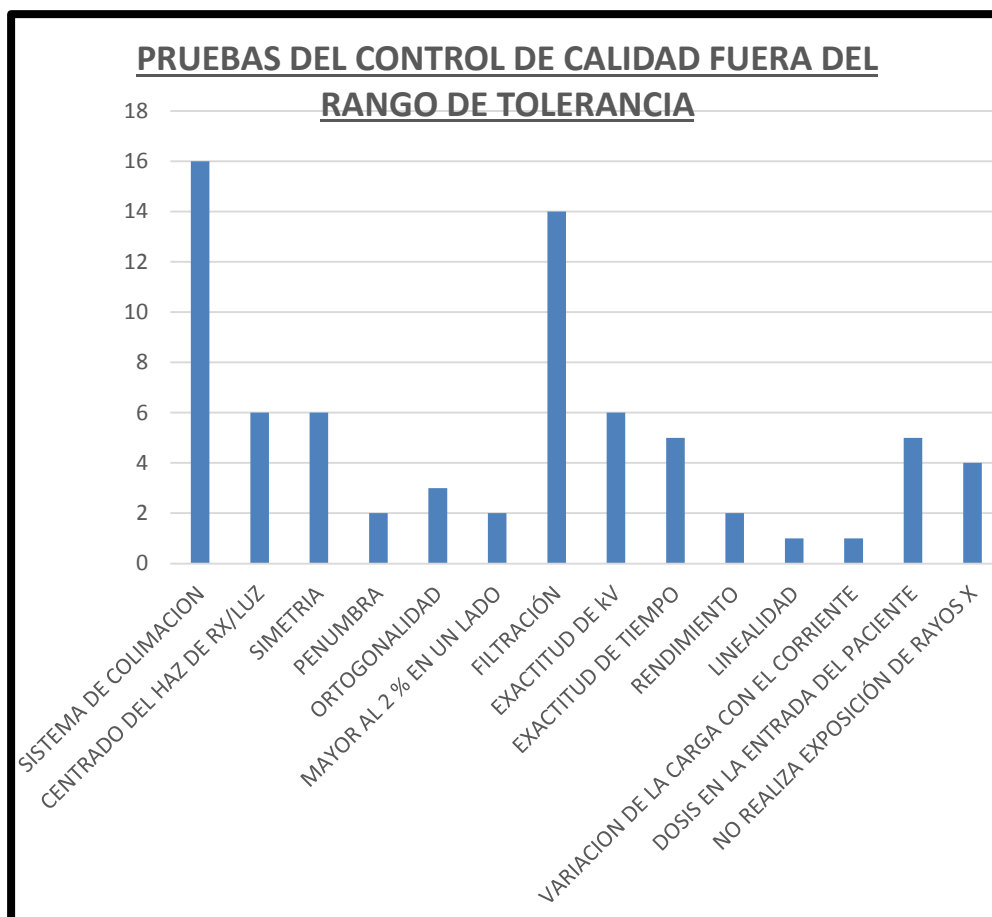


Figura 39: Estadística de las pruebas de control de calidad desaprobadas

Una parte importante de un equipo de radiografía general es la modalidad que usa para la visualización de la imagen del paciente, el equipo de radiografía convencional puede visualizar la imagen mediante un procesamiento manual o usando una procesadora automática, el equipo de radiografía CR (computed radiography) utiliza un digitalizador previo a la visualización de la imagen y el equipo de radiografía digital utiliza un flat panel el cual permite visualizar la imagen directamente en el monitor de la sala de comando. Con los datos del total de equipos evaluados se procedió a realizar una estadística de la modalidad del sistema de visualización de la imagen (ver Figura 40).

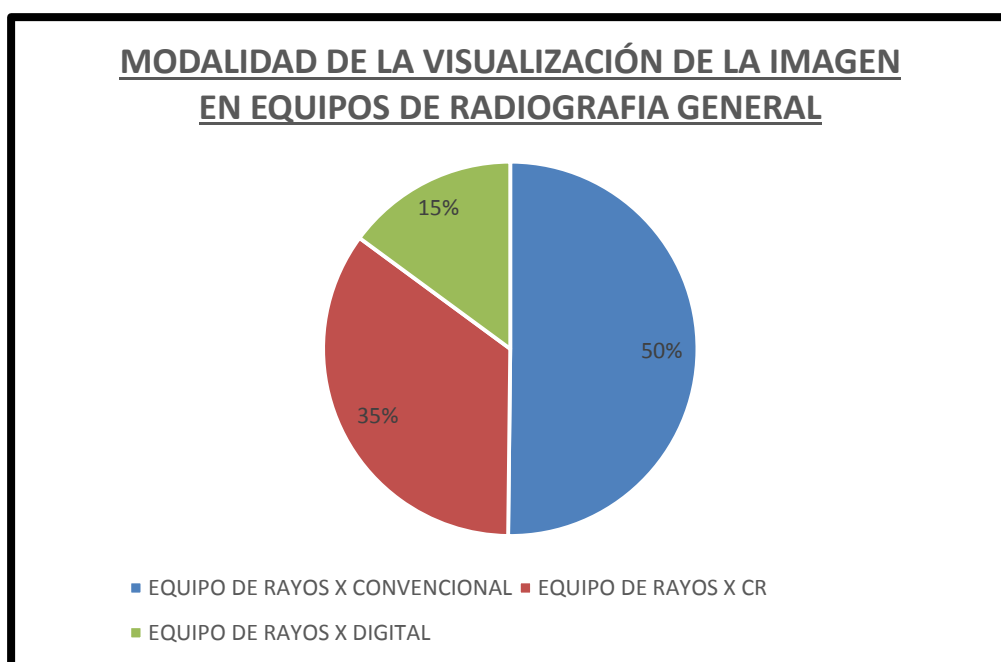


Figura 40: Estadística de la modalidad del sistema de visualización de la imagen

VI. DISCUSION

- Existe una gran cantidad de equipos de radiografía general aprobados (245 equipos, 89.1 %), esto se puede deber a varias razones: El control de calidad de equipos de rayos x de uso médico se inició en nuestro país hace aproximadamente 12 años, esta actividad la inicio el IPEN (como ente regulador del uso de la radiación en aplicaciones médicas) y en esos años la cantidad de equipos desaprobados era la mayor cantidad del total de equipos evaluados, es decir desde que se inició el control de calidad la verificación de los parámetros técnicos, geométricos y dosimétricos se hace de manera más continua y por ende una mayor evaluación conlleva a una menor probabilidad de errores del equipo. Otro punto que apoya este resultado es la renovación y adquisición de equipos nuevos de radiografía general, el mejoramiento de la tecnología en la producción de equipos de rayos x médico y sobretodo el mantenimiento periódico que los responsables de los equipos han entendido que se le debe de realizar a un equipo de estas características.
- El resultado de la prueba del control de calidad que se presenta en la mayor cantidad de equipos desaprobados es el del sistema de colimación. Cabe mencionar que esta prueba es importante porque permite tener la certeza que la coincidencia del campo de radiación y el campo luminoso se encuentra dentro de la tolerancia establecida y con esto el tecnólogo medico puede colimar teniendo la confianza que ambos campos se encuentran dentro de las tolerancias establecidas y la región de interés en el examen radiográfico estará garantizada, asimismo esta prueba permite proteger órganos radiosensibles del paciente, como por ejemplo la glándula tiroides, gónadas, cristalino, etc.

- El resultado de la prueba del control de calidad que se presenta como segundo en mayor frecuencia en la cantidad de equipos de radiografía general desaprobados es la prueba del HVL o Filtración del equipo. Esta prueba es muy importante porque es un indicador de la calidad del haz de rayos x y nos ayuda en la búsqueda del haz clínico adecuado del equipo. Calcular un HVL por debajo de la tolerancia establecida nos indica que se debe adicionar filtro al equipo esto debido a que en este caso el más perjudicado es el paciente ya que en el espectro de rayos x que se forma existe una gran cantidad de fotones de baja energía que no llegan a penetrar hasta el receptor de imagen y no ayudan o no benefician al diagnóstico del paciente y solo causan una mayor dosis absorbida en la piel del paciente. En el caso opuesto de encontrar un HVL muy elevado lo que se va a generar es un desgaste innecesario del tubo ya que el espectro de rayos x va a poseer una cantidad considerable de fotones de alta energía, es decir un haz de rayos x endurecido que no ayudan al diagnóstico del paciente y para que se forme la imagen lo que se va a hacer es colocar un tiempo de exposición más extenso y de esta manera se desgasta el tubo de rayos x y se disminuye la vida útil del mismo.

- Las demás pruebas desaprobadas no son menos importantes, por ejemplo: La Dosis en la entrada del paciente nos ayuda a evaluar la dosis absorbida en la piel del paciente y por ende en los órganos internos del mismo, generalmente se realiza la prueba para un examen de tórax para un paciente estándar. El rendimiento es un indicador de la calibración de la corriente del tubo y por ende de la producción de los rayos x, cuando el rendimiento se encuentra por debajo de la tolerancia establecida lo más idóneo es indicar que se deje de utilizar ese equipo de radiografía general. La linealidad se encuentra relacionada con el valor del rendimiento para cada combinación de diferentes técnicas radiográficas y estos valores deben ser casi constantes y así ayudar al tecnólogo a cambiar una técnica radiográfica de acuerdo al tipo de examen a realizar. La exactitud del tiempo de exposición y del kV es importante verificar ya que luego de la

evaluación se tendrá la certeza de cuanto difiere el valor nominal del valor medido.

- Después de obtener una prueba o varias pruebas desaprobadas se sugiere la corrección inmediata de esos parámetros antes de seguir utilizando el equipo en el diagnóstico de algún paciente.
- En la actualidad se está incrementando la cantidad de equipos de radiografía general con la modalidad de adquisición de imagen digital, de manera similar se encuentra la modalidad de radiografía CR y por ende se está relegando a la radiografía general convencional.
- Existe la necesidad de establecer un protocolo de control de calidad en radiodiagnóstico médico de índole nacional, es decir que se realice una evaluación de las condiciones sociales, económicas y ambientales de nuestro país que se consideren para la redacción del protocolo nacional. Al establecer este protocolo nacional la evaluación y los resultados serían acordes a nuestra realidad.
- Existe la necesidad de establecer niveles orientativos de dosis según nuestra realidad, las que se usan son recomendaciones internacionales.

VII. CONCLUSIONES

- El control de calidad de un equipo de radiografía general es importante porque ayuda a verificar el correcto funcionamiento y el desempeño en la generación de rayos x del mismo, teniendo en cuenta parámetros técnicos, geométricos y dosimétricos.
- El control de calidad permite detectar resultados fuera del rango de la tolerancia establecida, para posteriormente solicitar la corrección del equipo evaluado.
- El control de calidad ayuda en la protección radiológica del paciente, específicamente en la verificación de la dosis impartida al mismo, es decir verificar que dosis entregada se encuentre dentro de la tolerancia establecida y así conseguir cumplir el principio de ALARA.
- El control de calidad ayuda a concientizar al personal de salud de esta área, porque ellos observan el informe técnico con los resultados obtenidos y por ende conocer las bondades o debilidades del equipo bajo su responsabilidad.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuerdo de Cooperación Regional para la Promoción de la Ciencia Nuclear y Tecnología Nuclear en América Latina y el Caribe. (2001). *Protocolos de Control de Calidad en Radiodiagnóstico*. América Latina y el Caribe: ARCAL XLIX- International Agency Energy Nuclear [IAEA].
- Brosed, A. (2011). *Fundamentos de Física Médica, Volumen 1 Medida de la radiación*. Madrid: ADI Servicios editoriales.
- Brosed, A & Ruiz, P. (2012). *Fundamentos de Física Médica, Volumen 2 Radiodiagnóstico: bases físicas, equipos y control de calidad*. Madrid: ADI Servicios editoriales.
- Brosed, A & Guirado, D. (2016). *Fundamentos de Física Médica, Volumen 8 Radiobiología y Principios de Oncología*. Madrid: ADI Servicios editoriales.
- Bushong, S. (2010). *Manual de Radiología para Técnicos, Física, Biología y Protección Radiológica*. (9^{va} ed.). Barcelona: Elsevier España S.L.
- Dance, D.R. (2014). *Diagnostic Radiology Physics: A HandBook for Teachers and Students*. Viena: International Agency Energy Nuclear [IAEA].
- Oficina Técnica de la Autoridad Nacional [OTAN]. (2013). *Norma técnica IR.003.2013 “REQUISITOS DE PROTECCION RADIOLOGICA EN DIAGNOSTICO MEDICO CON RAYOS X”*. Lima: OTAN – Instituto Peruano de Energía Nuclear [IPEN].
- Organismo Internacional de Energía Atómica [OIEA]. (2016). *Protección Radiológica y Seguridad de las Fuentes de Radiación: Normas Básicas Internacionales de Seguridad GSR. PARTE 3*. Viena: International Agency Energy Nuclear [IAEA].

- Podgorsak, E. (2005). *Radiation Oncology Physics: A HandBook for Teachers and Students*. Viena: International Agency Energy Nuclear [IAEA].
- Sociedad Española de Física Médica, Sociedad Española de Protección Radiológica y Sociedad Española de Radiología Médica. (2012). *Protocolo Español de Control de Calidad en Radiodiagnóstico, Revisión 2011*. Madrid: Senda Editorial S.A.
- X RAY GROUP. (2014). Equipos. Lima.
<http://www.xrayperu.com.pe/xray-estacionarios.html>;
<http://www.xrayperu.com.pe/xray-rodables.html>;
<http://www.xrayperu.com.pe/xray-portatiles.html>, Revisado el 18 de Enero del 2018.

IX. ANEXO



INSTITUTO PERUANO DE ENERGIA NUCLEAR

Resolución de Presidencia

N° 123-13-IPEN/PRES

Lima, 03 de Junio de 2013

VISTOS: El Memorándum N° 079-13-OTAN y el Memorando No. 287-13-OTAN, ambos de la Oficina Técnica de la Autoridad Nacional, y;

CONSIDERANDO:

Que, el artículo 41° del Reglamento de Organización y Funciones del IPEN, aprobado mediante Decreto Supremo N° 062-2005-EM, señala que la Oficina Técnica de la Autoridad Nacional es el órgano de línea y la unidad orgánica técnica responsable de regular, autorizar, controlar y fiscalizar el uso seguro de las fuentes de radiación ionizante relativos a seguridad radiológica y nuclear, transporte, protección física y salvaguardias de los materiales nucleares en el territorio nacional;

Que, mediante Resolución de Presidencia N° 150-12-IPEN/PRES, se aprobó la Norma Técnica N° IR.003.2012 "Requisitos de Protección Radiológica en Diagnóstico Médico con Rayos X";

Que, la Tercera Disposición Complementaria del Reglamento de la Ley N° 28028, Ley de Regulación del Uso de Fuentes de Radiación Ionizante, aprobado por Decreto Supremo N° 039-2008-EM, establece que la Autoridad Nacional aprobará las Normas técnicas específicas y Directivas adicionales que estime necesarias para facilitar la aplicación del citado Reglamento;

Que, con Memorándum N° 079-13-OTAN, la Oficina Técnica de la Autoridad Nacional – OTAN, señala que ha considerado necesario revisar la Norma Técnica N° IR.003.2012 "Requisitos de Protección Radiológica en Diagnóstico Médico con Rayos X", a fin de precisar y clarificar sus disposiciones, para que facilite su aplicación y cumplimiento por parte de los usuarios;

Que, mediante Memorando No. 287-13-OTAN de la Oficina Técnica de la Autoridad Nacional, hace de conocimiento a Presidencia, haber culminado la revisión de la Norma Técnica N° IR.003.2012 "Requisitos de Protección Radiológica en Diagnóstico Médico con Rayos X", recomendando su actualización;

De conformidad con lo dispuesto en el Reglamento de Organización y Funciones del IPEN, aprobado por Decreto Supremo N° 062-2005-EM, y; del Reglamento de la Ley N° 28028, Ley de Regulación del Uso de Fuentes de Radiación Ionizante, aprobado por Decreto Supremo N° 039-2008-EM;

Con los vistos del Director Ejecutivo, de la Directora de la Oficina de Asesoría Jurídica, y del Director de la Oficina Técnica de la Autoridad Nacional (a .i.);





SE RESUELVE:

Artículo Primero.- Aprobar la Norma Técnica N° IR.003.2013 "Requisitos de Protección Radiológica en Diagnóstico Médico con Rayos X", cuyo texto, como anexo, forma parte integrante de la presente Resolución.

Artículo Segundo.- Dejar sin efecto la Resolución de Presidencia N° 150-12-IPEN/PRES.

Artículo Tercero.- Publíquese la presente resolución en el Diario Oficial El Peruano y en la página web institucional.

REGISTRESE Y COMUNIQUESE

CARLOS BARREDA TAMAYO
Presidente
Instituto Peruano de Energía Nuclear



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNÓSTICO MÉDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 1/19
---	---	---

ÍNDICE

0. INTRODUCCIÓN

1. OBJETIVO

2. ALCANCE

3. DEFINICIONES

4. REQUISITOS ADMINISTRATIVOS

4.1 Autorizaciones

4.1.1 Licencia y Registro de Instalación

4.1.2 Modificación de la Autorización

4.1.3 Licencias Individuales

4.2 Responsabilidades

4.3 Programa de Protección Radiológica

5. REQUISITOS DE SEGURIDAD

5.1 Equipos de rayos X

5.1.1 Características generales

5.1.2 Características específicas

5.2 Instalación de rayos X

5.3 Requisitos operacionales

5.4 Mantenimiento de equipos

6. EXPOSICIÓN OCUPACIONAL

6.1 Trabajadoras embarazadas

6.2 Clasificación de áreas de trabajo

6.3 Vigilancia radiológica de áreas

6.4 Vigilancia radiológica individual

6.5 Investigación y seguimiento

7. EXPOSICIÓN MÉDICA

7.1 Justificación

7.2 Optimización

7.3 Investigación de exposiciones médicas accidentales

7.4 Registros de las exposiciones médicas

8. EXPOSICIÓN DEL PÚBLICO

ANEXO I

Requisitos para obtener Autorización en diagnóstico médico con rayos X

ANEXO II

Requisitos para obtener Licencia Individual

ANEXO III

Programas de capacitación en Protección Radiológica para diagnóstico médico con rayos X

ANEXO IV

Elementos del Programa de Protección Radiológica

ANEXO V

Control de calidad en diagnóstico médico con rayos X

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNÓSTICO MÉDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 2/19
---	---	---

0. INTRODUCCIÓN

El uso de equipos de rayos X en el diagnóstico médico ocasiona un riesgo radiológico en pacientes, trabajadores y público, que debe mantenerse en un nivel aceptable, en concordancia con las limitaciones establecidas en la reglamentación.

Ambiente en la cual se lleva a cabo el procesamiento de películas radiográficas y el cargado de chasis.

1. OBJETIVO

101. Establecer los requisitos de protección radiológica en diagnóstico médico con rayos X.

f) **Equipo de rayos X**
Aparato fijo o móvil que produce rayos X que se usan para obtener imágenes con fines de diagnóstico médico, y que puede ser fijo o móvil.

2. ALCANCE

201. La norma es aplicable a toda persona natural o jurídica que realice actividades de diagnóstico médico con rayos X en el territorio nacional.

g) **Filtración**
Atenuación de los rayos X de baja energía por la interposición de un material en el haz primario.

3. DEFINICIONES

301. Para la aplicación de la presente norma se tendrá en cuenta las definiciones siguientes:

a) **Cabezal del equipo de rayos X**
Alojamiento blindado dentro del cual se encuentra el tubo de rayos X.

h) **Haz primario**
Haz de radiación que pasa a través de la abertura del colimador y que es usado para producir la imagen radiográfica.

b) **Colimador**
Dispositivo o mecanismo que limita el tamaño del campo de radiación al área de interés.

i) **Operador**
Persona que opera el equipo de rayos X. En el caso de fluoroscopia, se refiere también al médico que dirige el procedimiento radiológico y opera el equipo de rayos X.

c) **Consola de control**
Parte del equipo de rayos X que tiene los mandos e indicadores para seleccionar los factores radiográficos requeridos por un procedimiento radiológico y para activar e interrumpir la generación de rayos X.

j) **Procedimiento radiológico**
Procedimiento de imagenología médica o de intervención guiado por imágenes producidas por equipos de rayos X.

d) **Control de calidad**
Conjunto de pruebas estandarizadas aplicadas para verificar que el equipo de rayos X mantenga su desempeño dentro de las tolerancias permitidas.

k) **Radiación de fuga**
Radiación que escapa a través del blindaje del cabezal del equipo de rayos X, excepto el haz primario.

e) **Cuarto Oscuro**

l) **Radiación dispersa**
Radiación producida por la interacción del haz de rayos X con el medio en que incide, especialmente en el paciente.

m) **Radiología intervencionista**
Procedimiento de diagnóstico y tratamiento mínimamente invasivo guiado por imágenes radiográficas de rayos X.

n) **Sala de rayos X**
Ambiente donde se encuentra instalado el equipo de rayos X de diagnóstico médico y la consola de control, excepto en el caso de tomografía computarizada, donde solo se instala el equipo.



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNÓSTICO MÉDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 3/19
---	---	---

- o) Titular de la Autorización
Persona natural o jurídica autorizada para realizar actividades de diagnóstico médico con rayos X.

4. REQUISITOS ADMINISTRATIVOS

4.1. Autorizaciones

401. Las instalaciones que utilicen equipos de rayos X para diagnóstico médico deben contar con una autorización de la Oficina Técnica de la Autoridad Nacional (OTAN), conforme con lo dispuesto en el Art. 8 del Reglamento de la Ley 28028 (D.S. Nro. 039-2008-EM).

4.1.1. Licencia y Registro de instalación

402. Las instalaciones de radiología general, radiología especializada, tomografía computarizada, mamografía y radiología intervencionista, requieren licencia de operación, la misma que debe ser solicitada presentando los documentos exigidos en el Anexo I.A.

403. Las instalaciones de densitometría ósea con rayos X requieren registro de instalación para su operación, y debe ser solicitada presentando los documentos exigidos en el Anexo I.B.

404. Las licencias y registros deben ser revalidados cada 5 años presentando los documentos exigidos en el Anexo I.C.

4.1.2. Modificación de la Autorización

405. El cambio de titularidad de la licencia o registro de instalación, el cambio de dirección legal del titular, el cambio o incremento de equipos de rayos X, y el cambio o incremento de ambientes, requiere autorización de la OTAN, antes que esta se haga efectiva, para lo cual debe remitirse la información indicada en el Anexo I.D

406. Cualquier otra modificación será objeto de una nueva licencia.

4.1.3. Licencias individuales

407. El personal que interviene en actividades de diagnóstico médico con rayos X debe contar con

las siguientes licencias, según corresponda:

- a) Licencia de operador
- b) Licencia de oficial de protección radiológica
- c) Licencia de físico médico

408. El personal que solicite la licencia individual debe poseer la calificación correspondiente de acuerdo con lo especificado en el Anexo II.A y estar capacitado en protección radiológica según el Programa del Anexo III.

409. La licencia individual debe solicitarse presentando la documentación exigida en el Anexo II.B.

410. La revalidación de la licencia individual debe solicitarse presentando la documentación exigida en el Anexo II.C.

4.2. Responsabilidades

411. El Titular de la Autorización es responsable del cumplimiento de los límites y condiciones de la autorización, así como de las normas de seguridad radiológica.

412. El Titular de la Autorización es responsable de asegurar que:

- a) las actividades de diagnóstico médico con rayos X se realicen cumpliendo los principios de justificación, optimización y limitación de dosis;
- b) se cuente con personal capacitado, autorizado y en cantidad suficiente para desarrollar las funciones requeridas, acorde con el tipo y complejidad de los procedimientos radiológicos que se realicen, así como con la cantidad de equipos de rayos X a utilizar;
- c) que los procedimientos radiológicos se realicen o sean supervisados por un médico radiólogo u otro médico facultado para ello;
- d) que los procedimientos radiológicos prescritos sean realizados por operadores con licencia individual, utilizando equipos, técnicas y parámetros apropiados para el objetivo del diagnóstico, así como los procedimientos de protección radiológica aplicables.

413. Los establecimientos de salud que realicen procedimientos de radiología general, radiología especializada, tomografía computarizada,



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNÓSTICO MÉDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 4/19
---	---	---

mamografía y radiología intervencionista deben contar con oficial de protección radiológica y físico médico con licencia individual.

414.El oficial de protección radiológica tiene la función de supervisar el cumplimiento de las normas de protección radiológica y aplicar el programa de protección radiológica de la instalación.

415.El físico médico tiene la función de efectuar la optimización de las exposiciones médicas y supervisar o realizar las pruebas de control de calidad en la instalación.

416.Las funciones de protección radiológica y física médica deben ser realizadas por personal autorizado por la OTAN, de la instalación o externa a ella.

4.3. Programa de Protección Radiológica

417.Las actividades de diagnóstico médico con rayos X deben llevarse a cabo bajo un Programa de Protección Radiológica que contenga los elementos especificados en el Anexo IV.

5. REQUISITOS DE SEGURIDAD

5.1.Equipos de rayos X

5.1.1.Características generales

501.Los equipos de rayos X deben cumplir con las normas aplicables de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), Organización Internacional de Normalización (ISO) o normas equivalentes, así como con los siguientes requerimientos:

- a) poseer marcas o placas que permitan su identificación clara y legible (marca, modelo o tipo, número de serie);
- b) contar con un sistema de colimación para delimitar el campo de radiación a la región de interés;
- c) la filtración total no debe ser menor de 2,5 mm de Al, de los cuales, 1,5 mm de Al deben ser permanentes, excepto para los mamógrafos;
- d) contar con un soporte ajustable del cabezal, de manera que el tubo permanezca estable

durante una exposición, excepto los densitómetros óseos y tomógrafos computarizados;

- e) la radiación de fuga del cabezal no debe ser mayor que 1 mGy/h a 1 m en condiciones de ensayo de fuga.

5.1.2. Características específicas

502.Los equipos móviles deben contar con un cable de disparo de una longitud mínima de 2 m.

503.Los equipos de fluoroscopia deben:

- a) poseer un sistema de intensificador de imagen o sistema digital;
- b) contar con cortinilla plomada o equivalente para la protección del operador contra la radiación dispersa, excepto para los equipos arco en C rodantes;
- c) disponer de señal sonora cuando exista y esté accionado el control de "alto nivel";
- d) contar con dispositivo para medir el tiempo acumulado de fluoroscopia y con alarma sonora
- e) contar con un sistema de medición de tasa de dosis al paciente o medición del producto dosis por área;
- f) tener botón o pedal disparador que permita interrumpir la exposición en cualquier momento;
- g) estar diseñados, equipados y configurados específicamente para ser empleados en procedimientos rutinarios pediátricos.

504.Los equipos de mamografía deben poseer:

- a) un dispositivo para mantener una compresión apropiada de la mama;
- b) tubo específicamente diseñado para mamografía;
- c) punto focal no mayor a 0,3 mm para mamografía general;
- d) generador trifásico o de alta frecuencia;
- e) tensión de operación entre 25 y 35 kVp;
- f) distancia foco-película no menor a 60 cm;
- g) filtración total permanente no mayor a 0,03 mm de Mo o su equivalente;
- h) rejilla antidifusora.

505.Los equipos de tomografía computarizada (TC) deben poseer:



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNÓSTICO MÉDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 5/19
---	---	---

- a) medios que permitan la determinación visual del plano de referencia;
- b) dispositivos ubicados en la consola de control, mesa y gantry que permitan al operador interrumpir el procedimiento radiológico en cualquier instante;
- c) indicación visual en la consola de control del espesor del corte e incremento de barrido, antes del inicio de una serie;
- d) sistema para ajustar los números TC.

5.2. Instalación de rayos X

506. La instalación debe contar con una sala de rayos X, vestidor, así como ambientes para revelado, lectura e impresión de imágenes, espera de pacientes, según el procedimiento radiológico a realizar.

507. La sala de rayos X debe cumplir con lo siguiente:

- a) poseer barreras fijas blindadas cuyo espesor se fije en base a:
 - 0,1 mGy por semana en áreas controladas
 - 0,02 mGy por semana en otras áreas;
- b) en caso de contar con ventanas, deben estar a una altura suficiente que impida que la radiación dispersa en el exterior origine dosis mayores al límite para el público;
- c) contar con las señales de advertencia reglamentarias, ubicadas en las puertas de acceso a la sala de rayos X;
- d) en el caso de fluoroscopia y TC, contar con señal luminosa que se encienda durante el procedimiento radiológico;
- e) la puerta de acceso a la sala de rayos X debe poseer una cerradura que impida accesos inadvertidos;
- f) en el caso de fluoroscopia, la puerta no debe contar con ningún dispositivo que detenga la emisión de rayos X ante apertura imprevista;
- g) el haz primario no debe dirigirse a la consola de control o puertas de acceso a la sala de rayos X.

508. La consola de control del equipo de rayos X debe ubicarse detrás de barreras fijas, mamparas móviles o biombos, las cuales deben tener las siguientes características:

- a) el espesor de blindaje no debe permitir que las dosis sean mayores que 0,1 mGy por semana;
- b) dimensiones adecuadas para proteger al operador contra la radiación dispersa;
- c) visor con espesor equivalente a la barrera y dimensiones mínimas de 30 cm por 30 cm, u otro sistema para observar al paciente durante la exposición a los rayos X;

509. La sala de control para TC debe cumplir con lo siguiente:

- a) ser separada de la sala de rayos X y contar con puerta blindada de acceso a la sala de rayos X;
- b) el espesor de blindaje no debe permitir que las dosis en la consola de control sea mayor que 0,02 mGy por semana;
- c) contar con un visor espesor equivalente a la barrera y que permita al operador observar al paciente, el gantry, la camilla y la puerta de acceso a la sala de rayos X;
- d) tener medios para comunicarse con el paciente desde la consola de control durante el examen radiográfico;
- e) tener un acceso independiente de la sala de rayos X.

510. Las salas de rayos X deben tener dimensiones apropiadas para realizar sin dificultad los procedimientos radiológicos, de acuerdo al tipo de equipo, y con mínima exposición por radiación dispersa a las personas que intervienen.

511. En el caso de los densitómetros óseos, las dimensiones de la sala deben ser suficientes para que el operador se ubique a 1 m del paciente.

512. El ambiente de revelado o registro de imágenes debe estar diseñado bajo condiciones adecuadas para una buena obtención y observación de la imagen.

5.3. Requisitos operacionales

513. La instalación debe contar con procedimientos de protección radiológica a disposición de todo el personal.

514. El operador debe mantenerse instruido en protección radiológica en relación a las técnicas radiológicas y a los equipos a utilizar. En



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNÓSTICO MÉDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 6/19
---	---	---

radiografía digital, el operador debe ser entrenado en el uso de este tipo de equipos antes de efectuar procedimientos radiológicos para evitar exposiciones indebidas al paciente.

515.El operador debe usar los dispositivos de protección radiológica personal adecuados de acuerdo a la técnica radiológica a aplicar.

516.El uso de equipos móviles debe restringirse a casos en los que el paciente no pueda ser desplazado a una sala de rayos X.

517.En radiología intervencionista, el operador y las personas presentes en el procedimiento radiológico deben usar medios de protección individual, en especial para el cristalino.

518.Durante la realización de procedimientos radiológicos, solamente deben permanecer en la sala de rayos X el paciente, el operador, y si fuera necesario, otras personas autorizadas o acompañantes provistos de medios de protección.

519.Durante la exposición del paciente, el operador debe protegerse detrás de la barrera blindada de la consola de control y observar al paciente.

520.Durante las exposiciones, las puertas de acceso a la sala de rayos X deben permanecer cerradas.

521.En caso de procedimientos radiológicos en salas de hospitalización, donde haya otros pacientes que no puedan ser retirados de la sala, se deben emplear medios y medidas de protección que restrinjan su exposición.

522.No se deben realizar procedimientos radiológicos a distancias foco-piel menores a 45 cm en radiografía o menores a 30 cm en fluoroscopia.

523.Durante la operación de equipos móviles, los operadores deben utilizar medios de protección adecuados y las personas que no son pacientes deben estar situadas a no menos de 2 m del equipo.

524.Los equipos de rayos X deben ser posicionados de la manera más favorable para

reducir la dosis al personal que participa en el procedimiento radiológico.

5.4.Mantenimiento de equipos

525.El Titular de la Autorización debe asegurar que los equipos de rayos X tengan un adecuado mantenimiento y que sea realizado por persona natural o jurídica que cuente con la autorización de la OTAN.

6. EXPOSICION OCUPACIONAL

6.1.Trabajadoras embarazadas

601.En caso que una trabajadora expuesta sospeche o se encuentre embarazada debe comunicarlo al Titular de la Autorización, quien debe adaptar las condiciones de trabajo respecto a la exposición ocupacional para asegurar que se proporcione al embrión o feto el mismo nivel de protección que para miembros del público.

6.2.Clasificación de áreas de trabajo

602.Las salas de rayos X y las áreas donde se utilicen equipos de rayos X móviles deben ser consideradas como áreas controladas. Las otras áreas deben ser consideradas como públicas.

6.3.Vigilancia radiológica de áreas

603.En caso de daño o modificaciones en las barreras de protección de la sala de rayos X que podrían afectar su efectividad, este debe ser evaluado a fin de asegurar que se mantengan las condiciones de protección.

604.En el caso de radiología intervencionista se debe llevar a cabo un monitoreo de la radiación en la sala de rayos X, durante el procedimiento radiológico, a intervalos no mayores a 1 año, debiendo registrarse los resultados.

6.4.Vigilancia radiológica individual

605.Los trabajadores expuestos no deben recibir dosis mayores a los límites reglamentarios y sus exposiciones deben ser sometidas a optimización.



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNÓSTICO MÉDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 7/19
---	---	---

606. Los trabajadores expuestos así como el personal en entrenamiento que participan en los procedimientos radiológicos deben utilizar dosímetros personales proporcionados por un servicio autorizado por la OTAN.

607. Los operadores de tomografía computarizada y de densitometría ósea no requieren tener dosimetría personal de radiación externa en forma obligatoria.

608. Los trabajadores expuestos deben ser informados oportunamente sobre las dosis recibidas.

609. Los trabajadores expuestos deben usar correctamente el dosímetro personal durante la jornada de trabajo, siguiendo las indicaciones de buen uso suministradas por el Titular de la Autorización.

610. Los trabajadores expuestos que usen mandil plomado deben colocar el dosímetro personal debajo de éste.

611. En el caso de radiología intervencionista, los trabajadores expuestos deben usar dos dosímetros: uno debajo del mandil y otro encima del mismo.

612. El trabajador expuesto debe usar el dosímetro personal que le fue asignado solamente en la instalación que le proporciona dicho dispositivo.

613. En caso de pérdida o mal uso del dosímetro personal, el Titular de la Autorización debe informar a la OTAN sobre la estimación de la dosis recibida por el trabajador expuesto.

614. El Titular de la Autorización debe mantener un registro de las dosis de trabajadores expuestos, durante 10 años luego que el trabajador deje de laborar en la instalación o deje de trabajar con radiaciones.

6.5. Investigación y seguimiento

615. El Titular de la Autorización debe investigar las causas, implementar las medidas correctivas y registrar el hecho, si las dosis de los trabajadores expuestos superan:

- a) 5 mSv de dosis efectiva en un mes,
- b) 0,5 mSv de dosis efectiva en un mes si el dosímetro es usado debajo del mandil,
- c) 25% del límite de dosis equivalente en un mes.

616. El Titular de la Autorización debe investigar las causas, implementar las medidas correctivas, registrar el hecho y remitir, en un plazo de 10 días, un informe a la OTAN si las dosis de los trabajadores expuestos superan:

- a) 20 mSv de dosis efectiva,
- b) cualquier límite de dosis equivalente.

617. Los registros de investigación de dosis anormales de trabajadores deben mantenerse durante 30 años.

7. EXPOSICION MEDICA

7.1. Justificación

701. El Titular de la Autorización debe asegurar que todo procedimiento radiológico sea prescrito por un médico colegiado.

702. Las empresas o entidades que lleven a cabo exámenes masivos de personas con objeto de despistaje o como parte de programas de salud, deben realizarlos solamente cuando se cuente con la correspondiente prescripción escrita de un médico colegiado y demuestren que las exposiciones ocasionan un beneficio al grupo expuesto.

7.2. Optimización

703. Las dosis en pacientes deben optimizarse utilizando correctamente equipos acordes al tipo de procedimiento radiológico y aplicando técnicas apropiadas de reducción de dosis.

704. La sala de rayos X debe contar con avisos visibles que adviertan del riesgo a mujeres embarazadas o probablemente embarazadas, siendo necesario además que el operador pregunte a la paciente sobre esta condición a fin de prevenir su exposición inadvertida.

705. En caso de ser necesaria la exposición de mujeres embarazadas, se debe planificar el



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNÓSTICO MÉDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 8/19
---	---	---

procedimiento radiológico incluyendo las modificaciones que sean factibles y aplicar todas las medidas de protección necesarias para minimizar la dosis al embrión o feto.

706. Se debe utilizar todos los medios y medidas necesarias para que la dosis de los tejidos expuestos se mantengan tan bajas como sea razonablemente posible, especialmente en pediatría.

707. En el caso de intervencionismo, el médico responsable debe:

- asegurar que la dosis acumulada de radiación sea monitoreada continuamente durante el procedimiento radiológico;
- comunicar al paciente, como parte del consentimiento informado, de la posibilidad de efectos de la radiación en caso que la dosis en piel pueda exceder 3 Gy;
- registrar la ubicación y extensión del área irradiada en caso que la dosis en piel exceda 3 Gy e informar al paciente y a su médico tratante de los posibles efectos y efectuar su seguimiento durante un año;
- asegurar que se utilicen los factores apropiados para el procedimiento radiológico, pediátrico.

708. En fluoroscopia se debe controlar que el tiempo total de exposición, la tasa de exposición y la colimación, sean las adecuadas para el procedimiento radiológico y el paciente reciba solo la dosis necesaria para el examen.

709. En fluoroscopia pediátrica, el equipo y el procedimiento radiológico se debe configurar de modo que el paciente solo reciba la dosis necesaria para el examen.

710. En radiología digital se debe aplicar correctamente la colimación de imagen, efectuar un posicionamiento adecuado del paciente y utilizar la técnica más apropiada para evitar dosis indebidas en el paciente.

711. En el caso de mamografía se debe tener en cuenta que:

- el receptor de imagen sea compatible con el sistema mamográfico;

- la exposición al abdomen y feto de pacientes embarazadas no sea significativa;
- la compresión sea apropiada en los procedimientos;
- se use la máxima distancia foco – piel consistente con el procedimiento radiológico;
- se minimicen los tiempos de exposición.

712. Se debe realizar el control de calidad de los equipos de rayos X antes de iniciar su operación, anualmente y luego de un mantenimiento correctivo, según lo indicado en el Anexo V.

713. El control de calidad de los equipos de rayos X debe ser realizado por persona natural o jurídica que cuente con la autorización de la OTAN.

714. En los equipos de densitometría ósea se debe realizar la prueba de "Exactitud de las medidas de densidad mineral ósea", la cual puede ser realizada por el usuario haciendo uso del maniquí y del propio programa de análisis suministrado con el equipo y según especificaciones del fabricante.

7.3. Investigación de exposiciones médicas accidentales

715. El Titular de la Autorización debe disponer la investigación en caso que:

- se realice un procedimiento radiológico a una persona distinta al paciente;
- se realice un procedimiento radiológico a un tejido u órgano diferente al previsto;
- se produzca falla en el equipo o error en la aplicación del procedimiento radiológico que cause exposición accidental al paciente.

716. Cuando ocurran eventos indicados en 714, el Titular de la Autorización debe:

- estimar las dosis recibidas por el paciente y aplicar las medidas correctivas;
- remitir un informe a la OTAN mencionando las causas y medidas correctivas implementadas, en un plazo no mayor de 10 días;
- informar al paciente y a su médico sobre el suceso.

7.4. Registro de las exposiciones médicas



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNÓSTICO MÉDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 9/19
---	---	---

717. Se debe mantener un registro de las exposiciones médicas, por un período de 5 años, con los datos del paciente, procedimiento radiológico, nombre del operador y del médico prescriptor. En caso de radiología intervencionista, también se debe registrar la dosis y el tiempo total de fluoroscopia.

8. EXPOSICIÓN DEL PÚBLICO

801. Se debe implementar las medidas para evitar ingresos de personas no autorizados a las salas de rayos X durante los procedimientos radiológicos.

802. La exposición de personas que presten apoyo voluntario a los pacientes, durante un procedimiento radiológico, debe restringirse de manera que sea improbable que su dosis exceda 5 mSv.



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNOSTICO MEDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 10/19
---	---	--

ANEXO I

REQUISITOS PARA OBTENER AUTORIZACIÓN EN DIAGNÓSTICO MÉDICO CON RAYOS X

A. Licencia de operación

Para la obtención de la licencia en radiología general, radiología intervencionista, radiología especializada, tomografía computarizada y mamografía, se debe presentar los siguientes documentos en mesa de partes de la OTAN:

- 1) Formulario 2 del Texto Único de Procedimientos Administrativos (TUPA) debidamente llenado y firmado por la persona natural o su representante autorizado y en caso de persona jurídica, por el representante legal;
- 2) Anexo 2.2 del Formulario 2 del TUPA por cada equipo;
- 3) Copia del certificado de control de calidad de cada equipo emitido por un servicio autorizado o reconocido por la OTAN;
- 4) Comprobante de depósito por derechos de licencia, según el TUPA vigente.

B. Registro de Instalación

Para la obtención del registro en densitometría ósea se debe presentar los siguientes documentos en mesa de partes de la OTAN:

- 1) Formulario 1 del TUPA debidamente llenado y firmado por la persona natural o su representante autorizado y en caso de persona jurídica, por el representante legal;
- 2) Comprobante de depósito por derechos de registro, según el TUPA vigente.

C. Revalidación de Licencia de Operación o Registro de Instalación

Para la revalidación de la licencia de operación o registro de instalación, se debe presentar los siguientes documentos en mesa de partes de la OTAN:

- 1) Formulario 4 del TUPA debidamente llenado y firmado por la persona natural o su representante autorizado y en caso de persona jurídica, por el representante legal;
- 2) Comprobante de depósito por derechos de revalidación, según el TUPA vigente.

D. Modificación de la Licencia de Operación o Registro de Instalación

Las modificaciones solo son posibles cuando la autorización está vigente y procede en los siguientes casos:

D.1. Cambio de Titularidad. En este caso se debe presentar los siguientes documentos en mesa de partes de la OTAN:

- 1) Solicitud presentada por la persona natural o su representante autorizado y en caso de persona jurídica, por el representante legal, indicando la razón social, dirección legal y la modificación requerida;
- 2) Declaración de aceptación de responsabilidad del nuevo Titular.
- 3) Comprobante de depósito por derechos de trámite, según el TUPA vigente.



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNOSTICO MEDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 11/19
---	---	--

D.2. Cambio de dirección legal. Se debe presentar en mesa de partes de la OTAN:

- 1) Solicitud presentada por la persona natural o su representante autorizado y en caso de persona jurídica, por el representante legal, indicando la razón social, dirección legal y la modificación requerida;
- 2) Comprobante de depósito por derechos de trámite, según el TUPA vigente.

D.3. Cambio, reemplazo o incremento de equipos o de ambientes. Se debe presentar los siguientes documentos en mesa de partes de la OTAN:

- 1) Solicitud presentada por la persona natural o su representante autorizado y en caso de persona jurídica, por el representante legal, indicando la razón social, dirección legal y la modificación solicitada;
- 2) Anexo 2.2 del Formulario 2 del TUPA por cambio, reemplazo o incremento de equipos o ambientes, debidamente llenado y firmado por la persona natural o su representante autorizado y en caso de persona jurídica, por el representante legal;
- 3) En caso de reemplazo o incremento de equipos, copia del certificado de control de calidad de cada equipo;
- 4) Comprobante de depósito por derechos de trámite, según el TUPA vigente.



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNOSTICO MEDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 12/19
---	---	--

ANEXO II

REQUISITOS PARA OBTENER LICENCIA INDIVIDUAL

A. Calificación del personal para obtener la Licencia Individual

A.1 Para operador de equipos de rayos X

- 1) Médico o tecnólogo médico en radiología o técnico en radiología ^(*).
- 2) Conocimientos de protección radiológica mediante la asistencia a un curso no menor a 20 horas.
- 3) Experiencia no menor de un (1) año en la operación de equipos de rayos X.

En el caso de operadores de equipos de densitometría ósea, debe ser profesional o técnico en el campo de la salud y tener una experiencia no menor de un (1) mes.

A.2 Para oficial de protección radiológica

- 1) Profesional de la salud, ingeniero o físico.
- 2) Conocimientos de protección radiológica mediante la asistencia a un curso no menor a 50 horas.
- 3) Experiencia no menor de un (1) año en tareas de protección radiológica.

A.3 Para físico médico en radiodiagnóstico

- 1) Profesional egresado de una maestría en física médica.
- 2) Entrenamiento o experiencia no menor de seis (06) meses.

B. Documentación a presentar para solicitar la Licencia Individual

El solicitante debe aprobar el examen de protección radiológica aplicado por la OTAN y presentar los siguientes documentos en mesa de partes de la OTAN:

- 1) Formulario 3 del TUPA debidamente llenado;
- 2) Certificado médico emitido por médico colegiado. Adjuntar hemograma y recuento de plaquetas;
- 3) Certificado de capacitación en protección radiológica en diagnóstico médico con rayos X;
- 4) Una foto actual tamaño carné;
- 5) Comprobante de depósito por derechos de licencia, según el TUPA vigente.

C. Revalidación de la Licencia Individual para todos los casos

El solicitante debe presentar los siguientes documentos en mesa de partes de la OTAN:

- 1) Formulario 3 del TUPA debidamente llenado;
- 2) Certificado médico emitido por médico colegiado. Adjuntar hemograma y recuento de plaquetas;
- 3) Certificado o constancia de actualización o re-entrenamiento en protección radiológica;
- 4) Una foto actual tamaño carné;
- 5) Comprobante de depósito por derechos de revalidación de licencia individual, según el TUPA vigente.

(*) Para considerar este requisito cumplido el solicitante debe ser técnico titulado de una institución educativa reconocida por el Estado o estar reconocido como tal en el establecimiento de salud donde labore.



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNOSTICO MEDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 13/19
---	---	--

ANEXO III

PROGRAMAS DE CAPACITACION EN PROTECCIÓN RADIOLÓGICA PARA DIAGNÓSTICO MÉDICO CON RAYOS X

A. Curso para operadores de equipos de rayos X (20 horas)

1. Conceptos fundamentales:

- a) el átomo; estructura atómica; nomenclatura nuclear;
- b) unidades de masa y energía;
- c) radiación electromagnética;
- d) ionización.

2. Interacción de los rayos X con la materia:

- a) interacciones básicas: efecto fotoeléctrico y dispersión Compton;
- b) absorción diferencial; contraste; atenuación;
- c) capa hemirreductora.

3. Magnitudes y unidades de radiación:

- a) exposición; kerma;
- b) dosis absorbida;
- c) dosis equivalente;
- d) dosis efectiva.

4. Medición de las radiaciones:

- a) principios de detección;
- b) cámara de ionización;
- c) dosímetros personales.

5. Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes:

- a) relaciones dosis-respuesta; concepto de daño y riesgo; efecto directo e indirecto;
- b) efectos determinísticos; dosis aguda;
- c) efectos estocásticos; inducción de cáncer y efectos genéticos;
- d) efectos en el embrión y feto.

6. Rayos X:

- a) producción de rayos X; interacción electrón-blanco;
- b) radiación característica y radiación de frenado;
- c) espectro de rayos X; factores que afectan el espectro; cantidad y calidad de rayos X;
- d) máquina de rayos X; tubo de rayos X; consola de control; alta tensión; sistemas de imagen;
- e) equipos de radiodiagnóstico: general; especial; fluoroscopia; digital; tomografía; mamografía y densitometría ósea.



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNOSTICO MEDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 14/19
---	---	--

7. Protección radiológica en radiodiagnóstico:

- a) objetivos; principios fundamentales de la protección radiológica; justificación de las exposiciones; optimización de las dosis; limitación; cultura de seguridad;
- b) medidas generales de protección; exposición externa; parámetros de protección: tiempo, distancia y blindaje;
- c) requisitos de diseño y protección en el equipo; radiación de fuga; cronómetro;
- d) factores y dispositivos que afectan el haz; tensión; tamaño de campo; filtración. Radiación dispersa y control de la radiación dispersa;
- e) requisitos de diseño del ambiente; ubicación del ambiente; barreras de protección; detalles a considerar;
- f) procedimientos de seguridad; uso de dispositivos de protección; procedimientos generales y específicos para radiografía; fluoroscopia; mamografía; tomografía;
- g) protección del paciente; control de calidad del equipo de rayos X; reducción de dosis innecesarias; niveles orientativos.

8. Normativa en protección radiológica:

- a) sistema de control de las radiaciones; autoridad nacional; marco legal;
- b) reglamentación nacional vigente;
- c) proceso de licenciamiento y registro de instalaciones y personal;
- d) fiscalización; sistema de notificación; régimen de sanciones.

Aspectos prácticos: Mediciones de dosis en un ambiente de rayos X y verificación de las condiciones de protección radiológica.

B. Curso para oficiales de protección radiológica (50 horas)

El programa debe incluir el contenido del curso de operadores y los siguientes temas que deben ser realizados en forma de talleres teórico-prácticos:

1. Definición de las responsabilidades del personal de diagnóstico médico con rayos X
2. Estudio de casos accidentales. Análisis de causas y medidas preventivas
3. Elaboración del Programa de Protección Radiológica. Elaboración de procedimientos y registros
4. Preparación de documentación reguladora
5. Uso de detectores de radiación. Levantamiento radiométrico
6. Aspectos básicos de control de calidad de equipos de rayos X

C. Curso de Actualización (5 horas)

En caso de asistir a un curso de actualización, éste debe contemplar los temas actuales de protección radiológica en diagnóstico médico con rayos X y una revisión de los conceptos generales y aspectos reguladores, con énfasis en los temas de protección radiológica del paciente (procedimientos y técnicas radiológicas, reducción de dosis, etc.) y normativa nacional vigente.



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNOSTICO MEDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 15/19
---	---	--

ANEXO IV

ELEMENTOS DEL PROGRAMA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA

El programa debe contener lo siguiente:

1. Estructura organizacional

- a) Datos generales de la instalación (razón social y dirección legal).
- b) Descripción y esquema general de la organización. Relación de personal, cargos, calificaciones y licencias individuales.
- c) Asignación de responsabilidades del personal con respecto a la protección radiológica.
- d) Disposiciones para asegurar que las responsabilidades hayan sido comprendidas y para que solamente el personal calificado y autorizado sea responsable del uso de los equipos de rayos X, así como de dirigir el procedimiento radiológico.
- e) Programa de educación y entrenamiento continuos en procedimientos radiológicos y protección radiológica

2. Descripción de las instalaciones

- a) Plano del servicio y sus instalaciones.
- b) Descripción de los equipos.
- c) Lista de estudios y procedimientos radiológicos ofrecidos.

3. Procedimientos

3.1 Protección radiológica ocupacional

- a) Condiciones especiales: notificación del embarazo por parte de las trabajadoras y para la adaptación de su trabajo con el fin de proteger el embrión o feto, personal en entrenamiento, etc.
- b) Designación de las áreas de trabajo. Señalización.
- c) Empleo del dosímetro en las áreas controladas, reglas del uso correcto del dosímetro, informe de los reportes de dosis a los trabajadores, y reglas para estimar dosis a trabajadores en caso de pérdida, daño o mal uso del dosímetro.
- d) Empleo de los medios de protección: barreras, mandiles protectores, u otros medios de protección, y de las pruebas de integridad de estos medios.
- e) Monitoreo de radiación en caso de radiología intervencionista: puntos de medición y su frecuencia.
- f) Intercambio de información, en caso que los trabajadores laboren en otra instalación con radiaciones.
- g) Vigilancia médica del trabajador expuesto.
- h) Programa de educación y entrenamiento continuos en procedimientos radiológicos y protección radiológica

3.2 Protección radiológica del paciente

- a) Para evitar la exposición de pacientes sin prescripción médica.
- b) Para evitar la exposición inadvertida de pacientes en estado de gestación.
- c) Uso correcto de los medios de protección para pacientes: mandiles protectores, protectores gonadales, de ojos, entre otros.
- d) Optimización de dosis o uso correcto de los equipos en caso de pacientes embarazadas o pacientes pediátricos.



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNOSTICO MEDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 16/19
---	---	--

- e) Mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos.
- f) Determinación de las dosis representativas en pacientes (dosis de entrada, producto dosis-área o dosis en órganos).
- g) Para reducir la tasa de rechazo de películas.
- h) Control de calidad de cada equipo. Pruebas de aceptación. Acciones a seguir en caso de detectarse irregularidades y seguimiento de acciones correctivas.

3.3 Protección radiológica del público

- a) Para evitar el acceso inadvertido a los equipos de rayos X por personal ajeno al servicio.
- b) Para evitar la permanencia de personas que acompañan al paciente.
- c) Para la protección de los acompañantes de pacientes que prestan ayuda o porque los pacientes son menores de edad.

3.4 Casos accidentales

- a) Investigación ante fallas o errores con potencial para ocasionar dosis mayores a las previstas en pacientes.
- b) Estimación de dosis accidentales recibidas en pacientes, trabajador expuesto y público e implementación de medidas correctivas.
- c) Estimación de la dosis a gestantes y al feto luego que se haya detectado su exposición inadvertida, y se informe a la paciente y al médico que prescribió el examen.
- d) Seguimiento de pacientes que recibieron exposiciones altas con potencial de causar efectos determinísticos.

4. Registros

Mantenimiento de los siguientes documentos y registros:

- a) Autorizaciones de la OTAN, condiciones de la autorización, actas de inspección y correspondencia relacionada con la autorización.
- b) Registro de dosis individual del personal del servicio
- c) Resultados del monitoreo de radiación (solo para las prácticas que lo requieran)
- d) Resultados del control de calidad de equipos y sistemas de imagen
- e) Registro de pacientes atendidos y procedimientos radiológicos realizados
- f) Valores de dosis relevantes a pacientes en procedimientos radiológicos de intervencionismo
- g) Certificados de calibración de monitores de radiación
- h) Informes de investigación de incidentes o accidentes
- i) Capacitación del personal
- j) Mantenimiento preventivo y correctivo
- k) Vigilancia médica del personal del servicio
- l) Auditorías internas y/o externas del Programa de Protección Radiológica.



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNOSTICO MEDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 17/19
---	---	------------------------------

ANEXO V

CONTROL DE CALIDAD EN DIAGNÓSTICO MÉDICO CON RAYOS X

El control de calidad se realizará siguiendo procedimientos técnicos aprobados por la OTAN, que incluirán como mínimo las siguientes pruebas:

Equipo de Radiografía

Colimación (perpendicularidad del rayo central, coincidencia de campos)
Tensión del tubo (exactitud, repetibilidad)
Tiempo de exposición (exactitud, repetibilidad)
Control automático de exposición (repetibilidad, compensación)
Rendimiento y tasa de kerma en aire (repetibilidad, linealidad)
Filtración (capa hemirreductora)
Dosis en la Superficie del Paciente (Tórax P.A. Cráneo P.A. Columna lumbar A.P.)

Equipo de Fluoroscopia

Colimación y tamaño de imagen: Coincidencia del tamaño del campo de radiación y el nominal, Coincidencia del tamaño del campo de radiación y de la imagen, distorsión)
Control automático de brillo (CAB) (compensación, repetibilidad)
Tasa de dosis máxima en la entrada del intensificador de imagen
Tasa de dosis máxima en la entrada de la piel del paciente
Resolución de alto y bajo contraste

Equipo de Tomografía Computarizada

Coincidencia de indicadores luminosos y haz de radiación
Desplazamiento longitudinal de la mesa
Localización y espesor del plano de corte (localización del plano, espesor de corte)
Filtración total (capa hemirreductora)
Tensión del tubo (exactitud y repetibilidad)
Calidad de imagen
Rendimiento y tasa de kerma en aire (repetibilidad y linealidad)
Dosis en el paciente (CDTI)



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNOSTICO MEDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 18/19
---	---	--

Equipo de Mamografía

Colimación
Tensión del tubo (exactitud, repetibilidad)
Tiempo de exposición (exactitud, repetibilidad)
Control automático de exposición (repetibilidad, compensación)
Rendimiento y tasa de kerma en aire (repetibilidad, linealidad)
Filtración (capa hemirreductora)
Compresión
Calidad de la imagen mamográfica
Dosis en la superficie de la mama

Adicionalmente para los equipos de mamografía digital se deben realizar las siguientes pruebas:

Desempeño del detector
Resolución (limitación espacial y modulación de la función de transferencia)



OFICINA TÉCNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL	REQUISITOS DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA EN DIAGNOSTICO MEDICO CON RAYOS X	IR.003.2013 Página: 19/19
---	---	--

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DECRETO SUPREMO Nro. 039-2008-EM. Reglamento de la Ley 28028. Lima (2008).
- [2] DECRETO SUPREMO Nro. 009-97-EM. Reglamento de Seguridad Radiológica. Lima (1997).
- [3] DECRETO SUPREMO Nro. 011-2006-VIVIENDA. Normas Técnicas del Reglamento Nacional de Edificaciones. Lima (2006).
- [4] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Radiological protection and safety in medicine. ICRP Publication 73. Oxford (1996).
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radiological Protection for Medical Exposure to Ionizing Radiation. Safety Guide No. RS-G-1.5. Vienna (2002).
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Applying radiation safety standards in diagnostic radiology and interventional procedures using X rays. Safety Reports Series No. 39. Vienna (2006).
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice. Technical Reports Series N° 457. Vienna (2007).
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Quality assurance programme for screen film mammography. IAEA Human Health Series No. 2. Vienna (2009).
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Quality assurance programme for digital mammography. IAEA Human Health Series No. 17. Vienna (2011).
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Interim Edition. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3 (Interim). General Safety Requirements. Vienna (2011).
- [11] Ley 28028. Ley de Regulación del uso de fuentes de radiación ionizante. Lima (2003).
- [12] ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. Protección contra la radiación ionizante de fuentes externas utilizadas en medicina. Cuaderno Técnico No. 15. Washington (1988).
- [13] PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION. Diagnostic Imaging in the Community. A Manual for Clinics and small Hospitals. Pre-Publication Draft Copy. (2011).
- [14] PROYECTO ARCAL XX/OIEA. Requisitos de Seguridad Radiológica para la práctica de Radiodiagnóstico médico. Quito (2000).
- [15] SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA MÉDICA, SOCIEDAD ESPAÑOLA DE PROTECCIÓN RADIOLÓGICA y SOCIEDAD ESPAÑOLA DE RADIOLOGÍA MÉDICA. Protocolo español de control de calidad en radiodiagnóstico. Madrid (2011).

